

СУЧАСНІ МЕТОДИ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОГО ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА В КОМБІНОВАНИХ ПАРОГАЗОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Кулик М.П.¹, Семерак М.М.², Кравець Т.Ю.²

¹Івано-Франківський НТУ нафти і газу

вул. Карпатська 15, 76009, м. Івано-Франківськ

²Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів

kravets@ukr.net, m_p_kulik@ukr.net

Енергетика України відрізняється від енергетики більшості країн Європи нестачею маневрових потужностей, які використовуються для покриття пікових навантажень. Діючі електричні станції в Україні, що побудовані у 20-ому столітті, в більшості своїй вичерпали свій проектний ресурс. А потужностей гідроакмулюючих електростанцій недостатньо, тому для покриття пікових навантажень часто використовують вугільні блоки теплових станцій. Часті їх зупинки та пуски прискорюють зношеність вугільних блоків, підвищують ризики появи аварійних ситуацій та погіршують екологічну ситуацію через збільшений вплив на довкілля. У сфері теплової енергетики відомий, крім парового циклу генерації, газовий цикл, який при наявності деякої інфраструктури в Україні широко не використовується. Автори, на основі аналізу публікацій показали, що при поєднанні парової та газової генерації в комбінованих парогазових енергетичних установках, особливо у тих, які працюють на твердому органічному паливі, загальний коефіцієнт корисної дії може зрости на 5–10 %. При цьому робоче тіло для газової генерації формується у додатковому передтопку циклонного типу, а продукти неповного згоряння поступають у основну топку. Така комбінована енергетична установка характеризується значно вищою мобільністю (швидким набором чи зменшенням потужності), а також зростає діапазон її зміни, що покращує маневровість установки. На спалювання палива в таких установках (в додатковий передтопок та основну топку) подається атмосферне повітря, збагачене киснем з використанням мембранних технологій. А робоче тіло для газової генерації формується на основі азотної фракції, при цьому в окислювачі, який поступає в процес спалювання, зменшується частка азоту, що спричиняє зниження утворення окислів азоту. Цей факт, при зменшенні об'єму димових газів, суттєво покращує екологічну ситуацію, навіть при використанні кам'яного вугілля низької якості. *Ключові слова:* парова та газова генерація, азотна фракція, збагачене киснем атмосферне повітря, маневровість та мобільність енергоблоків, поліпшення екологічності.

Modern methods of burning solid fossil fuel in a combined steam and gas power plants. Kulyk M., Semerak M., Kravets T.

The energy sector of Ukraine differs from the energy sector in most European countries by the lack of manoeuvring capacities that are used to cover peak loads. Existing power plants in Ukraine have exhausted their design resources. The capacities of pumped storage power plants are insufficient; therefore, coal power units of thermal power plants are often used to cover peak loads. Their frequent shutdowns and starts accelerate the wear of these power units, increase the likelihood of emergencies and worsen the environmental situation due to the growth of negative environmental impact. In the field of thermal energy, in addition to the steam generation cycle, the gas cycle is known, which, if there is some infrastructure in Ukraine, is not used. The authors argue that with a combination of steam and gas generation in combined cycle gas power plants, the overall efficiency can increase by 5–10 %, including those that run on solid fossil fuels. In this case, the working fluid for gas generation is formed in an additional cyclone pre-furnace, and the products of incomplete combustion are fed into the main furnace. Such a combined power plant is characterized by increased manoeuvrability, and the range of changes in its power is also growing. It is proposed to supply atmospheric air enriched with oxygen using membrane technologies for fuel combustion in such plants. The working fluid for gas generation is formed on the basis of the nitrogen fraction, while the fraction of nitrogen in the oxidizer, which enters the combustion process, reduces the formation of its oxides. Under such conditions, the volume of flue gases decreases, the environmental situation improves significantly, even when using low-quality coal. *Key words:* steam and gas generation, nitrogen fraction, atmospheric air enriched with oxygen, manoeuvrability and mobility of power units, environmental friendliness improvement.

Постановка проблеми. Енергетична система більшості країн Європи та деяких країн на інших континентах, в тому числі енергетика пострадянських країн, та, зокрема, України базується на теплових (ТЕС), атомних (АЕС), гідро- (ГЕС) та гідроакмулюючих (ГАЕС) електростанціях, а також на альтернативних та відновлювальних джерелах генерації. В структурі потужностей об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України спостерігається дефі-

цит маневрових потужностей [1–3]. Використання з цією метою вугільних блоків ТЕС, більшість яких побудовані у 60–70-тих роках минулого століття, підвищує ризики виникнення аварійних ситуацій на територіях їх розташування, та прискорює зношеність вказаних блоків, більшість з яких вже відпрацювали свій проектний ресурс.

Вказані недоліки відсутні у парогазових енергетичних установках, які в енергетиці України при

наявності інфраструктури в плані проектування, відповідної кількості рідкого і газового палива та випуску газових турбін [4], чомусь не використовуються.

Аналіз досліджень та публікацій. Новітні підходи в традиційній енергетиці полягають в поєднанні в одній енергетичній установці парової та газової турбоустановок, при чому газова турбіна повинна працювати на паливі, яке найбільш доступне в сфері теплової енергетики. Звідси витікає необхідність використання вугілля, мазуту чи природного газу, та застосування для нагріву робочого тіла газової турбіни тепла спалювання традиційного палива. Часткове вирішення таких задач запропоновано в роботах [5; 6; 7]. Однак в них немає комплексного підходу до співвідношення часток парової та газової частин.

Прообразом такого підходу до енергетичних установок слід вважати схоже технічне рішення німецьких інженерів (патент ФРН № 839290, «Парогазова теплосилова установка», 1944 р.). У вказаному патенті німецькі інженери запропонували частину неохолоджених димових газів після очищення від твердих включень скеровувати до газової турбіни, яка за допомогою окремого електрогенератора вироблятиме додаткову кількість електричної енергії.

Аналіз ефективності роботи комбінованої парогазової енергетичної установки, парова та газова генерація яких працює з використанням робочого тіла, отриманого при допомозі тепла від спалювання твердого органічного палива, проведений в роботах [8; 9]. Авторами цих робіт зроблений висновок, що за умови розподілу основного енергетичного ресурсу, тобто кам'яного вугілля, по схемі 50 % / 50 %, коефіцієнт корисної дії може зрости, як мінімум, на 5 %.

Уже тривалий період для зменшення утворення оксидів азоту використовують ступеневе спалювання палива усіх видів в котельних агрегатах з подачею атмосферного повітря з різними значеннями коефіцієнту надлишку повітря, причому, як пропонують автори роботи [10], надлишок повітря на першій ступені $\alpha_1 = 0.8-0.85$, і на другій $\alpha_2 = 1.2-1.3$. Це забезпечує зниження утворення оксидів азоту на 40–50 %. У випадку триступеневого спалювання палива співвідношення коефіцієнтів надлишку повітря буде дещо іншим.

Крім ступеневого спалювання палива, існує стадійне спалювання (двох - або трьохстадійне), з використанням основної та додаткової топки, найчастіше циклонного типу, яке теж має свої переваги.

Виділення невирішених частин проблеми. Метою даної роботи є покращення маневровості енергетичної установки – розширення діапазону зміни потужності та підвищення її мобільності, під якою розуміють швидкість набору (або зниження) потужності.

Якість викопного органічного палива – кам'яного вугілля всіх марок постійно погіршується, а в далекій перспективі поліпшення не передбачається,

тому одночасно із збільшенням перехідних режимів в роботі вугільних енергоблоків, виникає проблема скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря.

Викладення основного матеріалу. Одна із можливих реалізацій двохстадійного спалювання твердого палива з використанням теплоти, отриманої на першій стадії, для забезпечення роботи газової турбіни, запропонована в роботі [11], а блочна схема такої установки приведена на рис. 1.

Згідно розробленій конструкції на початковій стадії в рубашці охолодження додаткової топки (циклонного передтопка) формується робоче середовище. Особливістю запропонованої енергетичної установки є те, що компресор виконаний, щонайменше у вигляді двох ступіней, а пристрій збагачення повітря киснем включений між ступенями, та з'єднаний також ще і з газгольдером азоту.

Потоки вугільного пилу можуть перерозподілятися (частина іде в додатковий циклонний передтопок (додаткову топку) і потрапляє в котельний агрегат, інша частина подається безпосередньо в котельний агрегат минаючи додаткову топку.

Енергетична установка описаної конструкції працює наступним чином. В додаткову топку 2 поступає вугілля низької якості, де починається горіння, а в топці 1 воно догорає, а гази (тобто продукти горіння) віддають тепло в пароперегрівачі котлової води, утворюючи при цьому перегрітий пар. В такий спосіб реалізується паровий цикл генерації електричної енергії.

В першій ступені компресора 4 Атмосферне повітря в першій ступені компресора 4 стискується і поступає в пристрій збагачення повітря киснем 6, а збагачена киснем суміш, другою ступенню 5 компресора подається по лінії 17 в нижню частину додаткової топки 2.

Менший об'єм збагаченої суміші проходить через рубашку 9 додаткової топки, де тепловими трубками 11 нагрівається до необхідних для ГТУ параметрів, і по лінії 15 поступає на вхід газової турбіни, яка розкручуючи окремий електрогенератор виробляє електроенергію. Відпрацьоване робоче тіло газової генерації іде на часткове спалювання палива у додатковій топці.

Значно більший об'єм загаченої киснем суміші йде в основну топку для інтенсивного спалювання основної частки палива разом із недопалом із додаткової топки.

Робоче тіло ГТУ після турбіни, характеризується ще досить високою температурою, поступає по повітропроводу 14 на вхід додаткової топки 2, куди по лінії 16 подачі палива поступає на горіння низькосортне вугілля. В рубашці 9 додаткової топки 42 знаходиться збагачена киснем повітряна суміш, що нагрівається досконалим теплопередавальним пристроєм (тепловими трубками) теплом від часткового спалювання вугілля.

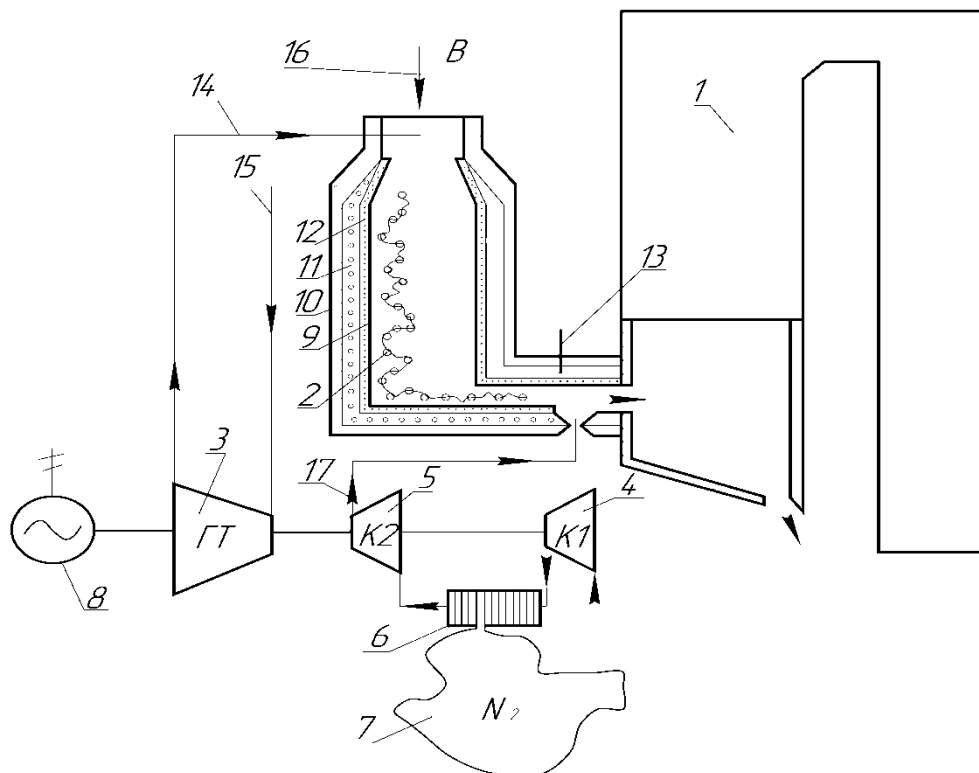


Рис. 1 Схема парогазової установки з додатковою топкою та розділювачем повітря

1, 2 – основна і додаткова топка, 3 – газова турбіна, 4, 5 – перша і друга ступінь компресора, 6 – пристрій збагачення повітря киснем, 7 – газгольдер-накопичувач азоту, 8 – електричний генератор газової частини, 9 – повітряна рубашка додаткової топки, 10 – зовнішня теплоізоляція додаткової топки, 11 – теплові трубки, 12 – внутрішня стінка додаткової топки, 13 – лінія вприску водяної пари в рубашку додаткової топки, 14 – лінія вихлопу газової турбіни, 15 – лінія робочого тіла на газову турбіну, 16 – подача палива в додаткову топку, 17 – лінія подачі збагаченого киснем повітря в рубашку додаткової топки

Оскільки в цій суміші вміст азоту дещо нижчий ніж в атмосферному повітрі, то в додатковій топці 2, як і в основній топці 1 котельного агрегату утворюються окисли азоту відповідно у менших кількостях, як в установках звичайного типу.

Таким чином, описана енергетична установка дозволяє значно знизити шкідливі викиди в атмосферне повітря, а також зменшити об'єм димових газів, оскільки не потрібно подавати на горіння атмосферне повітря з відповідним коефіцієнтом його надлишку. При цьому значно підвищується ефективність спалювання низькосортного твердого палива через те, що реакція утворення окислів азоту є ендотермічною, то підвищується температура в зоні горіння.

Однак, ефективність такої енергетичної установки дещо знижується необхідністю наповнення газгольдера-накопичувача, в якому зберігається суміш, збагачена азотом. В цьому випадку розділювач атмосферного повітря на компоненти, найбільш ефективно може працювати з використанням мембранних технологій, працює в «половину сили».

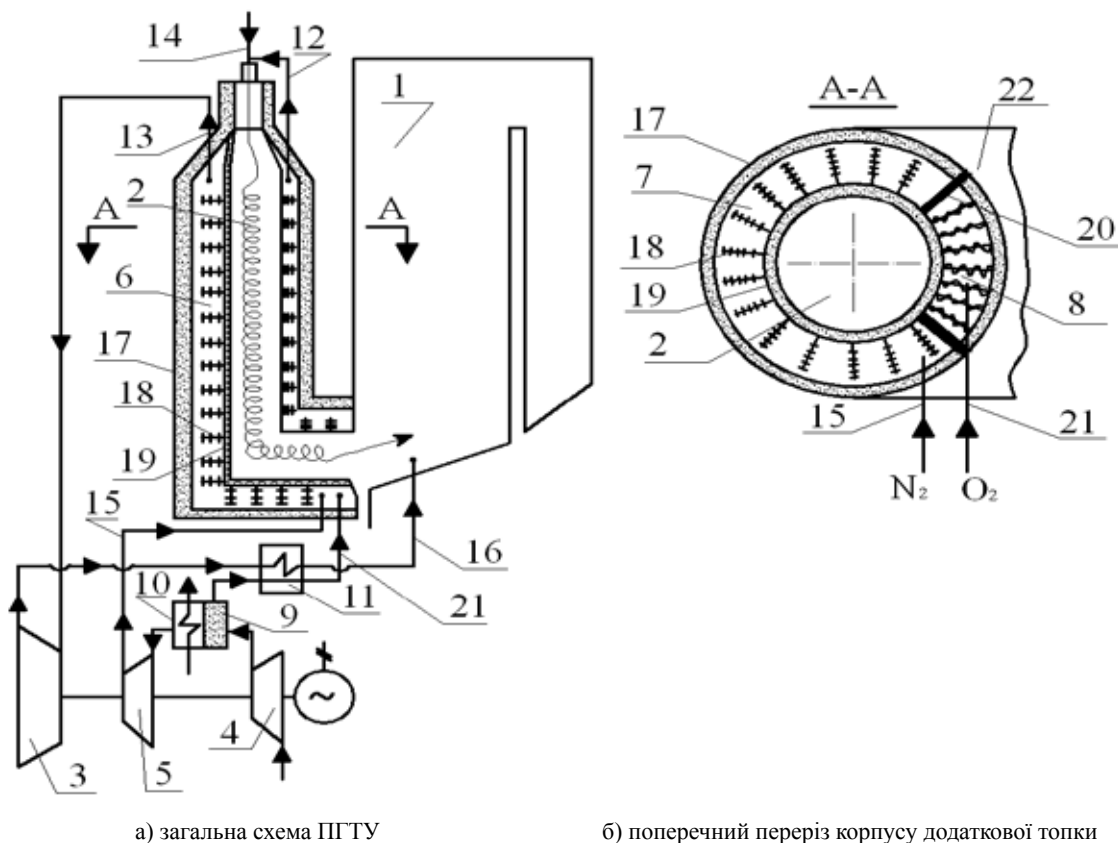
Детальний аналіз стану наявних технологій розділення повітря проведений авторами роботи [12]. Ці технології придатні для використання в процесах спалювання органічного палива, зокрема вугільного пилу, під час модернізації об'єктів теплової енерге-

тики з переходом на спільну генерацію за паровим та газовим циклами. Аналіз некріогенних методів розділення повітря та їх перспективи використання в промисловості, зокрема в хімічній - для отримання азоту при синтезі аміаку, проведений в роботі [13].

Подальше вдосконалення вищезгаданої комбінованої енергетичної установки [11] привело до розділення міжкорпусного об'єму додаткової топки на два відсіки – азотний і кисневий [14].

Принципова схема такої комбінованої енергетичної установки, в якій реалізується паровий та газовий цикл генерації електричної енергії, а додаткова топка містить два відсіки (один – для азотної фракції та кисневий – для атмосферного повітря збагаченого киснем) приведена на рис. 2. На рис. 2а показана загальна принципова схема, а на рис. 2б приводиться поперечний переріз корпусу додаткової топки, що включає азотний 7 та кисневий 8 відсіки.

Особливість цієї енергетичної установки полягає в тому, що отримані продукти розділення атмосферного повітря (збагачена фракція киснем і азотна фракція) використовуються для різних потреб. Збагачене киснем атмосферне повітря нагрівається у теплообміннику-регенераторі 11 відхідними газами турбіни 3 по лінії 21 попадає у кисневий відсік 8 додаткового передтопка, після наступного перегріву подається на запалювання пилоподібної суміші.



а) загальна схема ПГТУ

б) поперечний переріз корпусу додаткової топки

Рис. 2. Схема комбінованої енергетичної установки з мембранним розділювачем повітря та азотним і кисневим відсіками

1 – основна топка; 2 – додаткова топка; 3 – газова турбіна, 4, 5 – ступені Компресора; 6 – об'єм для охолодження; 7, 8 – азотна і киснева частина топки; 9 – мембранний розділювач повітря; 10 – охолодник; 11 – теплообмінник-регенератор; 12 – вихідний патрубок кисневої частини; 13 – лінія робочого тіла (азоту) на газову турбіну; 14 – тракт подачі палива в додаткову топку; 15 – лінія стиснутого азоту на нагрів; 16 – лінія вихлопу газової турбіни; 17 – теплоізоляція додаткової топки; 18 – теплові трубки; 19, 20 – внутрішня і роздільна стінки; 21 – киснева лінія на нагрівання; 22 – лінія скидання із додаткової топки

Азотна фракція атмосферного повітря після охолодника 10 по лінії 15 поступає у азотний відсік 7 додаткової топки, а після нагріву за допомогою теплових трубок 18, як робоче тіло з наперед заданими параметрами (тиском і температурою), скеровується по лінії 13 у газову турбіну.

Нагріта суміш збагачена киснем інтенсифікує процеси горіння у додатковій топці, а наявність у ньому значно меншої кількості азоту, ніж у звичайному повітрі, запобігає утворенню оксидів азоту, чим досягається суттєвий екологічний ефект.

На рис. 4б показаний поперечний перетин додаткової топки 2, яка виконана за схемою циклона з подвійними стінками, простір між якими розділений на два відсіки – азотний, в якому формується робоче тіло для газової генерації, а також кисневий, в якому атмосферне повітря, збагачене киснем, спочатку підігривається а в подальшому поступає на спалювання твердого палива.

Висновки. Запроновані в цьому дослідженні підходи до спалювання твердого органічного палива в комбінованих парогазових установках та проведення аналіз роботи таких установок дозволяє підсумувати наступне:

- енергетичні установки, з поєднанням парової та газової генерації, суттєво покращують маневровість та мобільність процесу виробництва електроенергії, що забезпечує покриття пікових навантажень;
- спалювання органічного палива в повітрі, збагаченому киснем, дозволяє використовувати паливо низької якості;
- внаслідок подачі у процес спалювання збагаченого киснем повітря зменшується об'єм димових газів, концентрація утворених оксидів азоту через меншу кількість атмосферного азоту, тобто покращується екологічна ситуація в зоні розташування теплової електростанції із вугільними енергоблоками.

Література

1. Воронцов С. Про відповідність Енергетичної стратегії України на період до 2030 року сучасним викликам і загрозам у сфері енергетичної безпеки. Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <http://www.niss.gov.ua/articles/470/>.
2. Мацевитий Ю.М., Стогний Б.С., Шидловский А.К. Научно-техническое обеспечение долгосрочных планов развития энергетики Украины. Энергетика та електрифікація. 2013. № 1. С. 48–52.

3. Праховник А.В. Развитие маневренной генерации ОЭС Украины как фактор повышения энергетической безопасности государства // А.В. Праховник, В.А.Попов, В.Ф.Находов, А.Г.Баталов, К.Б. Денисович. Энергетика та електрифікація. 2008. № 7. С. 9–12.
4. Патон Б.Є., Долинський А.А., Халатов А.А. і інш. Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології. Вісник НАН України (Київ). 2009. № 4. С. 61–69.
5. Кулик М.П. Підвищення ефективності комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок та зменшення екологічного забруднення навколишнього середовища. Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 5, 2008 р., С. 107–111.
6. Грінченко Д.М., Кулик М.П. Спосіб роботи енергетичної установки. Авт. свід. СРСР № 1188338, БВ № 40, 1985 р.
7. Пеньков В.І., Грінченко Д.М., Кулик М.П. Енергетична установка. Патент України № 18856, БВ № 6, 1997 р.
8. Семчук Я.М. Екологічні та техніко-економічні аспекти спільної роботи паро-газотурбінних енергетичних установок. / Я.М. Семчук, М.П. Кулик. Нафтогазова енергетика. 2008 р. № 1(6). С. 65–68.
9. Kulyk M.P. Analysis of the Possibility of Using Coal Technologies to Improve Manoeuvrability, Mobility and Ecological Compatibility of Thermal Power Plant Units / M.P. Kulyk, O.M. Mandryk, Y.S. Mysak. Geomatics and Environmental Engineering, No 2, Volume 10, 2016. P. 39–42.
10. Мисак Й.С. Об'єкти теплових електричних станцій. Режим роботи та експлуатації / Й.С. Мисак, Я.Ф. Івасик, П.О. Гут, Н.М. Лашковська. Видавництво НУ «Львівська політехніка», Львів. 2007. 254 с.
11. Пеньков В.І. Енергетична установка. / В.І. Пеньков, Д.М. Грінченко, М.П. Кулик. Патент України № 18 856, БВ. № 6, 1997 р.
12. Кулик М.П. Аналіз наявних технологій розділення повітря для підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетиці. / М.П. Кулик, Т.Ю. Кравець, М.М. Семерак. «Екологічні науки», № 21. 2018 р. С. 59–66.
13. Кириченко В.І. Некріогенні технології виробництва. 2. Мембранні системи виробництва кисню і перспективи їх розвитку / В.І. Кириченко, В.К. Осокіна, Б.Д. Рисюк, І.М. Новіков, О.Г. Голубов. Хім. пром-сть України. 2008. № 6. С. 58–68.
14. Грінченко Д.М., Енергетична установка. / Д.М. Грінченко, М.П. Кулик. Авт. свід. СРСР № 1813884, БВ № 17, 1993 р.