

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ КИСНЮ, ВОДНЮ ТА ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА В ТЕПЛОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

Кулик М.П.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ

m_p_kulik@ukr.net

Вугільні блоки теплових електростанцій, які є основою теплової енергетики України, характеризуються великими обсягами викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря. А ще одним із недоліків об'єднаної енергетичної системи України є нестача маневрових потужностей, у зв'язку з чим для покриття пікових навантажень використовуються вугільні блоки потужністю 150 і 200 МВт. До переліку шкідливих інгредієнтів, які містяться в димових газах, належать оксид і діоксид вуглецю, ангідриди сірки, оксиди азоту, вугільний пил і зола, а також солі важких металів. Найнебезпечнішою речовиною із вказаних вище за своєю токсичністю є оксиди азоту, їм належить і суттєва частка в екологічних платежах. Показано, що вказаних недоліків вугільних блоків можна позбутися, використовуючи комбіновані парогазові енергетичні установки, в яких робота газової частини забезпечується спалюванням твердого органічного палива, навіть вугілля низької якості. Суттєве зменшення об'єму димових газів, що викидаються в атмосферне повітря, досягається подачею на спалювання меленого вугілля газової суміші (повітря), збагаченої киснем. При цьому відпадає необхідність враховувати коефіцієнт надлишку повітря та зменшуються втрати тепла з відхідними газами. Збагачення здійснюється з використанням мембранних технологій для розділення газових сумішей, азотна фракція подається у міжкорпусний об'єм додаткової топки циклонного типу для формування робочого тіла газової генерації. Завдяки відсутності значної кількості азоту в газовому тракті котельного агрегату зменшується концентрація оксидів азоту в димових газах. Скорочення маси димових газів і концентрації деяких шкідливих компонентів призводить до зниження потужності пиловловлюючих систем і систем очищення димових газів і, відповідно, до зниження цими системами енергоспоживання. До того ж реакція утворення оксидів азоту є ендотермічною, через що підвищується температура факела та прискорюється швидкість реакції горіння, а в цьому випадку можна зменшувати габарити технологічного обладнання, або під час збереження таких габаритів збільшується їхня потужність. Газифікація вугілля, яке містить леткі компоненти, атмосферним повітрям багатим на кисень приводить до появи у продуктах газифікації водню та деяких компонентів синтез-газу. Спалювання такої газової суміші також покращує екологічну ситуацію. *Ключові слова:* парова та газова генерація, мобільність, маневровість, мембранні технології, повітря збагачене киснем, водень, газифікація вугілля, леткі компоненти, екологічні платежі.

Environmental aspects of using oxygen, hydrogen and organic fuel gasification products in thermal power of Ukraine.

Kulik M.

Coal units of thermal power plants, which are the basis of thermal power in Ukraine, are characterized by large volume emissions of harmful substances into the atmospheric air. Another drawback of Ukraine's unified power system is the lack of maneuverability that is why 150MW and 200 MW coal units are used to cover peak loads. The list of hazardous ingredients contained in flue gases includes carbon monoxide and carbon dioxide, sulfur anhydrides, nitrogen oxides, coal dust and ash, and heavy metal salts. Nitrogen oxides are the most dangerous substance of the above mentioned in toxicity and make a significant share in environmental payments. It is shown that these disadvantages of coal units can be eliminated by use of combined steam and gas power plants, where operation of the gas part is ensured by combustion of solid organic fuel, even coal of low quality. A significant reduction in the amount of flue gases released into the atmosphere is achieved by supply of oxygen-enriched gas mixture (air) to the milled coal during burning process. This eliminates the need to take into account a coefficient of excess air and reduces heat loss with flue gases. The enrichment is carried out using membrane technologies for separation of gas mixtures, nitrogen fraction is fed into the interfacial volume of an additional cyclone-type furnace for forming gas generation working fluid. Due to absence of a significant amount of nitrogen in the gas tract of the boiler unit, concentration of nitrogen oxides in flue gases is reduced. The reduction of flue gas mass and concentration of some harmful components decreases load on dust collection and flue gas purification systems, and consequently reduces power consumption of these systems. Additionally, formation of nitrogen oxides is endothermic, which increases torch temperature and accelerates combustion rate, thus it is possible to reduce dimensions of the process equipment, or increase its output with current dimensions. Gasification of coal, containing volatile components, with oxygen-rich atmospheric air, results in the appearance of hydrogen and other components of synthesis gas in gasification products. The combustion of such a gas mixture has positive effect on the environmental situation. *Key words:* Steam and gas generation, mobility, maneuverability, membrane technologies, oxygen-enriched air, hydrogen, coal gasification, volatile components, environmental payments.

Постановка проблеми. Одним із важливих елементів енергетики України є вугільні блоки, які побудовані в 60–70-х роках минулого століття, та на сьогодні більшість із них (80–90%) вичерпала свій технологіч-

ний ресурс [1–4]. Через нестачу маневрових потужностей деякі з них використовуються для покриття пікових навантажень під час споживання електроенергії. До недоліків вказаних блоків відносять досить великі

обсяги викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря. А робота вугільних блоків у непроєктних режимах ще більше погіршує екологічну ситуацію, чому сприяє також і погіршення якості кам'яного вугілля.

Необхідно враховувати і те, що часті зупинки та пуски вугільних блоків підвищують імовірність аварійних ситуацій, а використання вугілля низької якості не тільки погіршує екологічну ситуацію [5] в зоні розташування ТЕС, а й призводить до суттєвого зниження техніко-економічних показників їхньої роботи.

Для вирішення завдання ефективного покриття пікових навантажень доцільно застосовувати комбіновані парогазові енергетичні установки [6; 7]. Проте для роботи газової частини таких установок потрібне дорожче паливо. В Україні є деяка інфраструктура для газової генерації (проєктування, випуск газових турбін), але вказані енергетичні установки для отримання електричної енергії широко не використовуються. Водночас надмірна увага відновлювальним джерелам енергії не здатна вирішити згадані вище проблеми. Парогазові установки можуть працювати і на твердому органічному паливі, навіть на вугіллі низької якості. Але такі комбіновані парогазові енергетичні установки для отримання електроенергії чомусь в Україні широко не використовуються.

Актуальність дослідження та зв'язок авторського доробку з важливими науково-практичними завданнями. Метою роботи є дослідження можливості використання кисню, водню, а також продуктів газифікації кам'яного вугілля для генерації електричної енергії парогазовим методом та оцінка екологічних наслідків і перспектив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спрощений паровий цикл генерування електричної енергії складається з декількох етапів перетворення прихованої хімічної енергії викопного палива,

найчастіше з його видів використовуються кам'яне вугілля, нафта та природний газ.

Принципова блочна схема теплової електричної станції конденсаційного типу [8] наведена на рис. 1.

Алгоритм перетворення теплової енергії палива в електричну за циклом Ренкіна нараховує чотири етапи, кожен з яких має свій певний коефіцієнт корисної дії.

Під час спалювання вугілля в котельних агрегатах в атмосферу поступає величезна кількість токсичних речовин, серед яких – тверді шкідливі компоненти (зокрема, зола), а також димові гази, в яких переважають оксиди вуглецю (CO , CO_2), оксиди азоту (NO_x), сірчистий ангідрид і солі важких металів, потрапляння яких у повітря та ґрунти негативним чином впливає на довкілля.

Крім того, у вказаних газових сумішах можуть міститися продукти неповного згорання у вигляді незгорілих вуглеводнів C_x , H_y , N_z , серед яких своєю токсичністю, яка в сотні разів перевищує токсичність CO , виділяється формальдегід H_2CO .

Загальний коефіцієнт роботи електричної станції за стандартною схемою парової генерації перебуває в діапазоні 45–46%, а ефективність українських ТЕС значно нижча, в найгіршому випадку перебуває на рівні 33–35% через надмірну зношеність основного технологічного обладнання. В цьому плані вже назріла проблема переоснащення теплової енергетики України.

Газовий спосіб генерації електричної енергії реалізується в традиційних газотурбінних установках (далі – ГТУ), в склад яких входять повітряний компресор, камера згорання і газова турбіна, а також допоміжні системи, що забезпечують її роботу. Сукупність ГТУ й електричного генератора називають зазвичай газотурбінним агрегатом. Спрощена принципова схема такої ГТУ, яка показана на рис. 2, запозичена із книги 3 колективної монографії [9].

Атмосферне повітря поступає на вхід компресора, що виконаний у вигляді роторної турбомашини з обертовими та нерухомими лопатками. Відношення тиску за компресором p_b до тиску атмосферного повітря перед ним p_a називають ступенем стискування повітряного компресора і позначають як $\Pi = p_b / p_a$. Ротор компресора приводиться в рух газовою турбіною. Потік стисненого повітря подається в одну або дві і більше камер згорання. При цьому потік стисненого повітря від компресора здебільшого розділяється на два потоки. Перший потік скеровується до пальникових пристроїв, куди також поступає паливо (газове

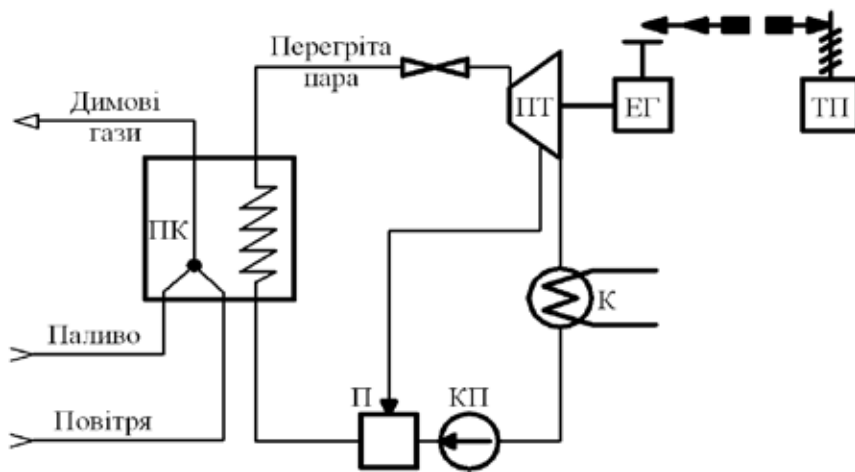


Рис. 1. Принципова блок-схема теплової електричної станції

ПТ – парова турбіна; ЕГ – електрогенератор; ПК – паровий котел;
 ТП – трансформаторна підстанція; К – конденсатор; КП – конденсатна помпа;
 П – підігрівник

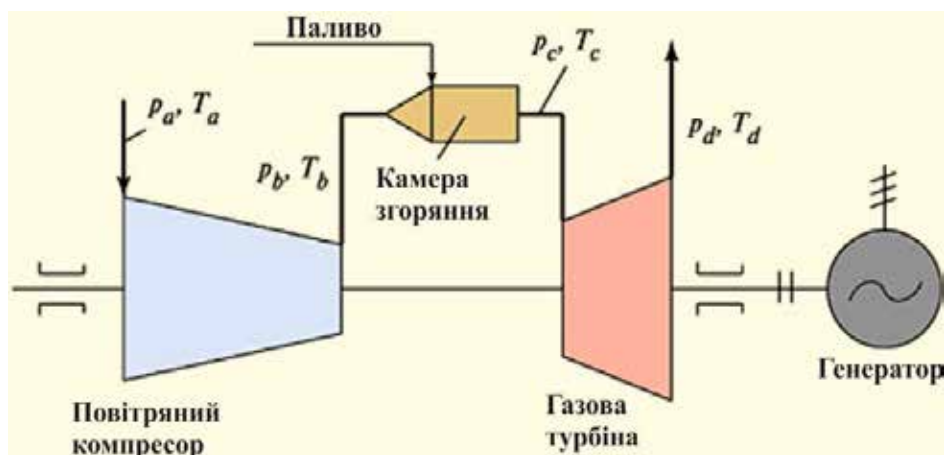
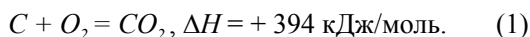


Рис. 2. Принципова схема газотурбінної установки

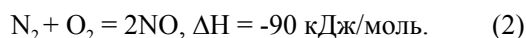
або рідке). Під час спалювання утворюються продукти згоряння високої температури, до них підмішується відносно холодне повітря для отримання робочого газу з допустимою для деталей газової турбіни температурою.

Загальний коефіцієнт корисної дії процесу виробництва електричної енергії за спрощеною схемою газової генерації [7] з використанням ГТУ є значно вищим за ефективність парового методу генерації та є у межах 55–60 %.

Для простої реакції спалювання вуглецевмісного палива, коли завжди проходить процес утворення CO_2 , теплота згорання (ΔH) є відомою:



Знак + у виразі (1) означає, що реакція горіння є екзотермічною, тобто протікає з виділенням тепла, яке надалі використовується більш-менш ефективно. Але під час згорання палива, зокрема, в котельних агрегатах ТЕС і промислових котлах завжди утворюються оксиди азоту, причому ця реакція утворення має ланцюговий механізм [10] і протікає з поглинанням теплоти, зокрема:



Із виразу (2) витікає, що надмірне утворення таких оксидів призводить до непродуктивних втрат теплоти, знижує температуру димових газів і негативно впливає не тільки на екологічні характеристики, але і на техніко-економічні показники процесу виробництва електроенергії.

Що стосується походження оксидів азоту, то широко відомі дослідники [10; 11] вважають за доцільне поділяти їх на паливні та атмосферні. Сировиною для перших є азотисті сполуки компонентів твердого або рідкого чи газоподібного палива, а для других – молекулярний азот атмосферного повітря, що подається в топку котельного агрегату для горіння. Діапазон зміни коефіцієнта надлишку повітря становить 1–1.2, причому для багаступеневого спалювання він різний для кожного ступеня,

а для першого ступеня [12] він може бути менший від одиниці.

Усунувши із окислювача, який подається в топку котельного агрегату, хоча б частину атмосферного азоту, можна пропорційно зменшити кількість досить небезпечної шкідливої компоненти димових газів (оксидів азоту).

Сучасні технології спалювання твердого органічного палива полягають у багаступеновому його горінні в одному котельному агрегаті та двохстадійному спалюванні палива в агрегаті з додатковою топкою (циклонним передтопком), причому на кожному ступені чи стадії використовують різне значення коефіцієнта надлишку повітря. Його реальне значення може бути дещо нижчим або вищим за значення коефіцієнта надлишку повітря, яке впливає із стехіометричного рівняння.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Відповідно, організувавши багаступеневе або двох- чи трьохстадійне спалювання твердого помеленого вугілля, суміщаючи його з підвищенням вмісту окислювача в атмосферному повітрі понад звичну ($\approx 21\%$) його частку, можна очікувати підвищення температури в зоні горіння та кількості тепла, яка передається робочому тілу за будь-якого способу генерації електричної енергії (паровий, газовий чи парогазовий). Це сприяє підвищенню ефективності процесів спалювання та зменшенню частки неповністю спаленого палива, яке подається в топку на початковій стадії технологічного процесу спалювання.

Такий перехід до «кисневого спалювання» неминуче призведе до відповідного зменшення масової витрати газової суміші, яка поступає на відповідний ступінь спалювання, та, зокрема, об'єму димових газів і концентрації деяких шкідливих інгредієнтів.

Новизна та загальнонаукове значення. Ще в кінці минулого століття автори [13; 14] запропонували для підвищення екологічності енергетичних установок використовувати мембранні технології, які тоді тільки починали стрімко розвиватися. Нині тех-

нології некріогенного виробництва кисню та азоту на місці споживання забезпечують виділення промислових газів із повітря, причому в цьому плані спостерігається технологічний прогрес [15–18]. Такі технології, зокрема мембранні, вже можуть забезпечити розділення атмосферного повітря за температур, близьких до температури довкілля. При цьому для отримання кисню та азоту використовується суттєва різниця між такими їхніми властивостями, як проникність і селективність.

Виклад основного матеріалу. Збагачення киснем атмосферного повітря (розділення) на базі мембранних технологій дає можливість не тільки інтенсифікувати процес спалювання, а також формувати робоче тіло для газової генерації на основі азотної фракції. Крім того, збагачене киснем повітря сприятиме покращенню техніко-екологічних показників технологічного процесу газифікації органічного палива.

Паралельне з'єднання в комбінованій енергетичній установці парової та газової генерації електроенергії, особливо тоді, коли газова її частина також працює на твердому паливі, забезпечує підвищення загального коефіцієнта корисної дії, розширює діапазон зміни потужності (поліпшує маневрові характеристики), а також дає змогу швидко набирати та скидати потужність енергоблока. Остання властивість характеризується високою мобільністю, тобто енергетична установка не матиме різких змін графіку зміни потужності, а в результаті усталеної роботи котельного агрегату не буде продукуватися надмірна кількість шкідливих речовин.

Передумова новітнього підходу в плані використання вугілля полягає в такому. Переважна більшість викопного палива – кам'яного вугілля – належить до категорії енергетичного, в якій горюча маса від 30% до 50% складається із летких речовин. За часткової газифікації такого палива утворюються суміш горючих газів, збагачена воднем, а в твердому залишку залишаються вуглець і зола. У такій

ситуації стає очевидним таке рішення, що для отримання теплової енергії необхідно спалювати газову компоненту, а вуглецевий залишок разом із золою необхідно виводити з енергетичного циклу для використання в інших галузях промисловості. Завдяки такій новітній технології без значних інвестицій емісія CO_2 скорочується щонайменше на третину.

Найважливішим фактором, який визначає ефективність застосування поліпшеного окислювача – збагаченого киснем атмосферного повітря, є виключення частки атмосферного азоту з участі в процесі спалювання органічного палива. Таке часткове виключення атмосферного азоту знижує концентрацію утворюваних оксидів азоту, реакція яких, будучи ендотермічною, підвищує температуру факела та температуру газів згорання, а значить – і коефіцієнт корисної дії процесу спалювання.

Зменшення об'єму відхідних газів із врахуванням зниження концентрації утворюваних оксидів азоту взаємно посилюються у величині валових викидів, оскільки такі показники перемножуються.

Головні висновки. Застосовуючи в теплової енергетиці сучасні технології спалювання «чорного» вугілля з використанням поліпшеного окислювача, можна досягти декілька позитивних моментів, як і в плані покращення термодинамічних характеристик ключового процесу в генерації електричної енергії паровим методом. Поєднуючи його з використанням баластного атмосферного азоту як робочого тіла газової генерації, в комбінованій парогазовій енергетичній установці вирішується проблема мобільності та маневровості. А на додачу суттєво покращується екологічність основних об'єктів теплової енергетики.

У перспективі, проводячи газифікацію органічного палива, а особливо кам'яного вугілля низької якості, в середовищі атмосферного повітря, збагаченого киснем, отримуємо газову суміш із відносно високою теплотворною здатністю.

Література

1. Теплова енергетика. Нові виклики часу. / за заг. ред. П. Омеляновського та Й. Мисака. Львів : НВФ «Українські технології», 2009. 659 с.
2. Проблемы развития и модернизации тепловой энергетики Украины / Стогний Б.С., Мацевитый Ю.М., Майстренко А.Ю. // *Проблеми розвитку енергетики. Погляд громадськості*. Київ, 2010. № 7. С. 90–95.
3. Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття або інтенсивне відновлення. *Наукові праці. Техногенна безпека*. Вип. 198. Т. 210. 2013. С. 31–36.
4. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С. / Київ : «Гнозіс», 2013. 308 с.
5. Екологічні проблеми енергетики. / Є.І. Крижанівський, Г.В. Кошлак // *Нафтогазова енергетика*. 2016. № 1 (25). С. 80–90.
6. Ковецкий В.М., Ковецкая Ю.Ю. Газотурбинные двигатели в энергетике: достижения, особенности, возможности. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. № 17. С. 24–30.
7. Патон Б.С., Долинський А.А., Халатов А.А. і ін. Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології. *Вісник НАН України (Київ)*. 2009. № 4. С. 61–69.
8. Андрущенко А.И. Основы термодинамических циклов теплоэнергетических установок. Москва : Высшая школа, 1985. 319 с.
9. Энергетика. История, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству. / Бондаренко В.И., Варламов Г.Б., Вольчин И.А., Карп И.Н., Сигал И.Я. // Научное редактирование Карп И.Н., Ландау Ю.Н. Сигал И.Я. Киев : ООО «Новый друк», 2011. Кн. 3. 263 с.
10. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Ленинград : Недра, 1988. 311 с.

11. Образование двуокиси азота при рассеивании дымовых газов. / И.Я. Сигал, Н.А. Гуревич, Э.П. Домбровская // *Теплоэнергетика*. 1980. № 11. С. 6–8.
12. Об'єкти теплових електричних станцій. Режими роботи та експлуатації. / Й.С. Мисак, Я.Ф. Івасик, П.О. Гут, Н.М. Лашковська // Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2007. 254 с.
13. Перспективы создания экологически чистых электростанций / Д.Н. Гринченко, М.П. Кулик / Тезисы докладов Республиканской н/т конференции «Проблемы и опыт охраны окружающей среды», г. Днепропетровск, 14–16 ноября 1990 г. С. 67.
14. Применение мембранных разделителей воздуха для повышения экологичности энергетических установок / Д.Н. Гринченко, М.П. Кулик / *Тезисы докладов н/т конференции «Современные химические технологии очистки воздушной среды»*. Сентябрь, 1992 г. Саратов. С. 94.
15. Енергоефективні і чисті технології в промисловості. / В.І. Кириченко, В.К. Осокіна, Б.Д. Рісюк, О.Г. Голубов, І.М. Новіков. / *Хімічна промисловість України*. 2009. № 5. С. 22–29.
16. Мембранні технології в хімічній і споріднених галузях промисловості. Перспективи розвитку і впровадження у виробництво. / В.І. Кириченко, В.К. Осокіна, Б.Д. Рісюк, О.Г. Голубов, І.М. Новіков. / *Хімічна промисловість України*. 2010. № 1. С. 31–37.
17. Кириченко В.І. Неокріогенні технології виробництва. 1. Розділення повітря у виробництві азоту на місці споживання. / В.І. Кириченко, В.К. Осокіна, Б.Д. Рісюк, О.Г. Голубов, І.М. Новіков. / *Хімічна промисловість України*. 2008. № 5. С. 50–58.
18. Кириченко В.І. Неокріогенні технології виробництва. 2. Мембранні технології виробництва кисню і перспективи їх розвитку. / В.І. Кириченко, В.К. Осокіна, Б.Д. Рісюк, О.Г. Голубов, І.М. Новіков. / *Хімічна промисловість України*. 2008. № 6. С. 58–68.