

**Кулик М.П.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## КОМБІНОВАНА ПГТУ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ ЯК ЕЛЕМЕНТ ШВИДКОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

*Енергетика України через зношеність технологічного обладнання знаходиться критичному стані. Вугільні блоки є джерелами викиду шкідливих речовин в атмосферне повітря. Запропоновано дві схеми ПГТУ, які поєднують паровий і газовий цикли генерації та працюють на продуктах газифікації вугілля. Підвищується маневровість блоків. Використання мембран для розділення повітря унеможливорює утворення оксидів азоту.*

**Ключові слова:** маневровість, мобільність, мембранне розділення повітря, паровий і газовий цикли генерації.

**Постановка проблеми.** Об'єднана енергетична система (далі – ОЕС) України базується на теплових (далі – ТЕС), атомних (далі – АЕС), гідро- та гідроакumuлюючих (далі – ГЕС, ГАЕС) електростанціях, а також незначною мірою на альтернативних і відновлювальних джерелах енергії. При цьому технологічне обладнання вказаних основних джерел, зокрема ТЕС, на 80–90% [1–3] вичерпало свій проектний ресурс. У структурі потужностей та об'ємах виробництва електроенергії вбачається, за різними джерелами, неоднозначне співвідношення [4] між суб'єктами генерації як у часи незалежності, так і після 2014–2016 років.

З іншого боку, структура ОЕС переобтяжена базовими потужностями діючих АЕС та вугільними блоками (300 і 800 МВт) теплової генерації, а тому встановлених потужностей ГЕС і ГАЕС, частка яких сягає більше ніж 7 ГВт, недостатньо для покриття пікових режимів споживання. Крім того, об'єкти теплової генерації є джерелом великих викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, а з погіршенням якості кам'яного вугілля їх обсяги будуть зростати. Робота вугільних енергоблоків (100–200 МВт) у неprojektних пікових і напівпікових режимах ще більше буде погіршувати техніко-економічні та екологічні показники ТЕС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У тепловій енергетиці, крім парового, відомий спосіб газової генерації електричної енергії, який за наявності певної інфраструктури в Україні широко не використовується. У високорозвинутих країнах значна частина генерувальних потужностей базується на газотурбінних технологіях [5]. Газові енергетичні установки мають дещо вищий коефіцієнт корисної дії, але потребують дорогого

газотурбінного палива, а також характеризуються значно нижчими викидами в атмосферу оксидів вуглецю та оксидів азоту.

Україна володіє повним циклом розроблення та виробництва промислових газових турбін, авіаційних і суднових газотурбінних двигунів та енергетичних установок. З іншого боку, досить перспективним видом термодинамічного циклу є комбінований парогазовий цикл, який полягає в тому, що для генерації водяної пари в котлі-утилізаторі використовують продукти згорання на виході з газової турбіни. Великі перспективи має для України використання парогазових енергетичних установок (далі – ПГУ) для утилізації доменного газу металургійних виробництв. Дослідження, виконані деякими вітчизняними науково-виробничими та конструкторськими структурами, доводять перспективність такого важливого напрямку використання згаданих установок у нафтопереробному комплексі на низькокалорійних газових відходах, що додатково зможе покращити екологічну ситуацію.

Вітчизняні науковці розробили газопаротурбінну установку типу «Водолій» [6] для утилізації відхідних газів газоперекачувальних агрегатів газотурбінних приводів нагнітачів природного газу магістральних газопроводів, що дає змогу підвищити рівень енергозбереження під час транспортування природного газу. Розроблена вказаними авторами технологія утилізації скидної теплоти ГТУ допомагає підвищити коефіцієнт корисної дії газотурбінних приводів компресорних станцій до 48%, зменшити витрати природного газу на власні потреби, а також майже удвічі, знижуються викиди забруднюючих речовин, що забезпечує відповідність вимогам Директив Європейського Союзу щодо допустимих викидів.

Однак, незважаючи на це, в нашій країні парогазову технологію для генерації електричної енергії чомусь широко ще не використовують.

**Постановка завдання.** Оновлена Енергетична стратегія України на період до 2035 року не вирішує наявних в енергетиці України проблем створення додаткових маневрових потужностей, зниження дефіциту пікових і напівпікових потужностей, а також скорочення викидів шкідливих речовин об'єктами теплової генерації.

Для стабілізації ситуації стосовно стійкості роботи ОЕС України в межах необхідної якості електричної енергії частка маневрової потужності об'єктів генерації має становити не менше ніж 20–30% від загальної потужності енергосистеми. Для цієї мети цілком підходять комбіновані ПГТУ, які можуть працювати навіть на продуктах газифікації твердого палива, зокрема кам'яного вугілля, в тому числі й вугілля низької якості власного видобутку. Реалізуючи технологію двох- і навіть трьохстадійного спалювання з використанням циклонних передтопоків і циркулюючого киплячого шару (ЦКШ), можна досягти екологічних стандартів [7] щодо викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря. Робоче тіло для газової частини формується в міжкорпусному об'ємі циклонного передтопка.

Екологічні проблеми парогазового способу генерації в таких комбінованих енергетичних установках можна частково вирішити при подачі в зону спалювання помеленого кам'яного вугілля атмосферного повітря, яке збагачується киснем за спеціально підбраною технологією, найбільш придатною для роботи в комбінованій парогазовій енергетичній установці (без загальноприйнятого нагепер коефіцієнта надлишку повітря на рівні не вищому за 1,15).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) енергоблоків, які перебувають в експлуатації на вітчизняних ТЕС, сьогодні знаходиться на рівні 28–38%, що збігається з ефективністю блоків на більшості російських ТЕС, обладнання яких виготовлено на тих же заводах-виробниках. Водночас на Заході будуються й надійно працюють вугільні енергоблоки з ККД 45–46%, а парогазові установки (в подальшому ПГУ), які там використовуються, мають ККД 55–58%.

Досягнення суттєвого техніко-економічного, а також екологічного

ефекту під час роботи енергетичних установок, які для забезпечення електричною енергією зможуть працювати на низькоякісному твердому, рідкому чи газоподібному паливі без новітніх ресурсозберігаючих технологій, у тепловій енергетиці неможливо.

Для докорінного підвищення ефективності ТЕС важливе значення має виведення з експлуатації старого низькоекономічного обладнання та заміна його перспективним, яке забезпечує радикальне зниження затрат на виробництво електроенергії й тепла, зниження витрат палива та збільшення коефіцієнта використання потужності, а також зменшення викидів у навколишнє середовище та ремонтних затрат.

Ще більший позитивний ефект може бути досягнутий тільки при спільній роботі паротурбінних і газотурбінних установок, у яких використовуються сучасні технічні рішення у сфері теплотехніки й теплопередачі [8].

Для вирішення вказаних вище проблем у вітчизняній енергетиці повинна використовуватися технологічна платформа «Екологічно чиста теплова енергетика високої ефективності» як складник «Енергетичної стратегії 2030», а також відповідні розділи оновленої програми «Енергетична стратегія України на період до 2035 року» – інструмент, що включає поєднання перспективних комерційних технологій, нових технологічних і промислових досягнень, скерованих на об'єднання зусиль усіх зацікавлених сторін (малого та середнього бізнесу, науки, держави, громадянського суспільства) на основі вдосконалення нормативно-правової бази.

Часткове вирішення таких завдань запропоновано в роботах М. Кулика [8] і П. Омеляновського та Й. Мисака [9]. Запропонована принципова блок-схема комбінованої енергетичної установки приведена на рис. 1. Паливо, здебільшого низької якості, розбивається на два потоки. Частина його спалюється за звичайною схемою, виробляється водяна пара необхідних параметрів для парової турбіни.

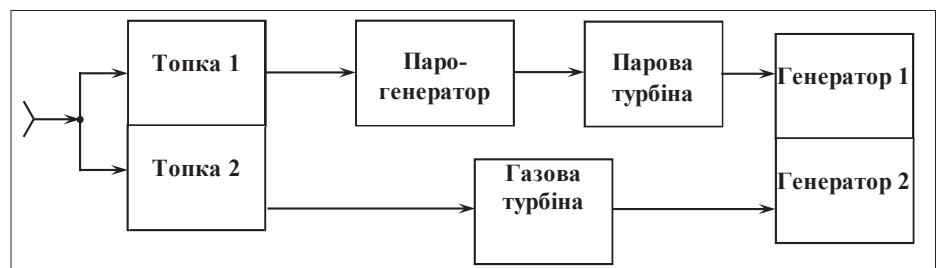
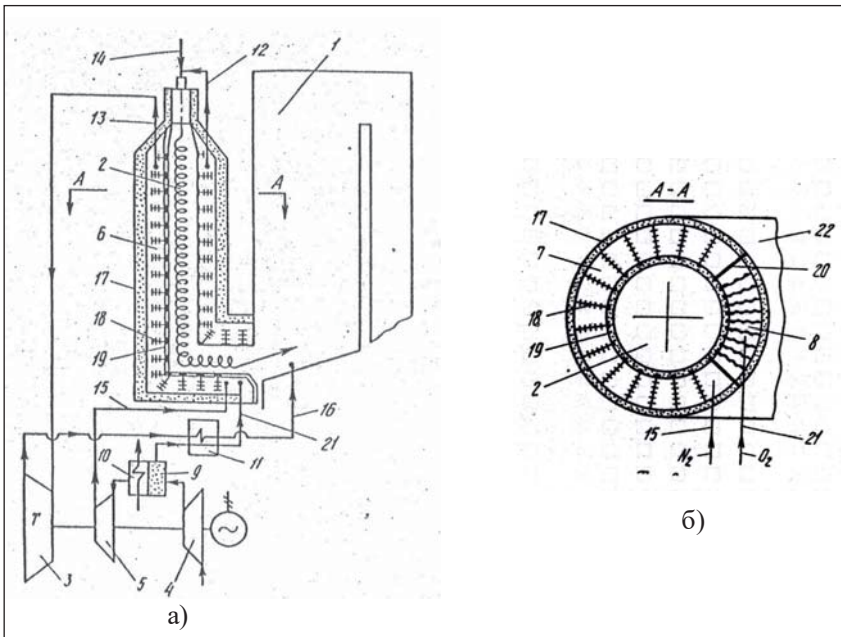


Рис. 1. Блок-схема виробництва електроенергії на базі паротурбінної й газотурбінної установок



**Рис. 2. Схема комбінованої енергетичної установки з мембранним розділювачем повітря й відсіками(азотним і кисневим):**

- 1 – основна топка; 2 – додаткова топка; 3 – газова турбіна; 4, 5 – ступені компресора; 6 – об’єм для охолодження; 7, 8 – відповідно азотна й киснева частина топки; 9 – мембранний розділювач; 10 – холодильник; 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 – відповідно внутрішня й роздільна стінки; 21 – киснева лінія на нагрів, 22 – скид додаткової топки

Друга частка палива надходить у модифіковану топку (циклонний передтопок), де певна кількість тепла передається, наприклад, у стисненому в компресорі атмосферному повітрі (чи іншому газоподібному робочому тілі), яке після додаткового стиснення може працювати в газовій турбіні.

Відмітимо, що коефіцієнт корисної дії нижньої ланки вже за рахунок відсутності одного блоку (етапу перетворення) буде дещо вищим за такий самий ККД верхньої ланки. Необхідно ще зауважити, що передача тепла від газів згорання в модифікованій топці з використанням теплових трубок також буде ефективнішою (топка 2). А це означає, що ККД нижньої ланки зросте ще більшою мірою. Результуючий ККД паралельного з’єднання при рівних кількостях вугілля, яке подається в додаткову та основну топку, за оцінкою авторів [5], може зрости до 5%.

При подачі в зону спалювання збагаченого киснем атмосферного повітря зменшується загальний об’єм викидів унаслідок подачі меншої кількості атмосферного повітря, а також концентрація оксидів азоту через значно нижчу кількість

атмосферного азоту. Такий спосіб у металургії давно відомий і широко використовується у вигляді так званого «кисневого дуття».

Збагачення атмосферного повітря киснем найбільш доцільно здійснювати при використанні мембранних технологій розділення з отриманням суміші збагаченої киснем та азотної фракції, яка скеровується в міжкорпусний відсік циклонного передтопка для формування робочого тіла газового циклу генерації.

Запропонована авторами [10] енергетична установка з мембранним розділювачем повітря забезпечує не тільки високу маневреність і мобільність енергоблоку, а й суттєве зниження утворених оксидів азоту через відсутність достатньої кількості азотовмісної сировини для їх утворення.

Переведення великої енергетики на комбіновані ПГТУ для підвищення мобільності в плані

покриття пікових навантажень та орієнтація на суворі вимоги щодо екологічності енергетичних установок, а з іншого боку, значна вартість газотурбінного палива (газоподібного чи рідкого) та погіршення якості енергетичного вугілля ставлять перед сучасними науковцями подвійне і взаємовиключне завдання: уникнути використання газотурбінного палива, що тягне за собою газифікацію кам’яного вугілля, в тому числі низької якості; забезпечити дотримання жорстких вимог екологічного законодавства, адаптованого до європейських директив.

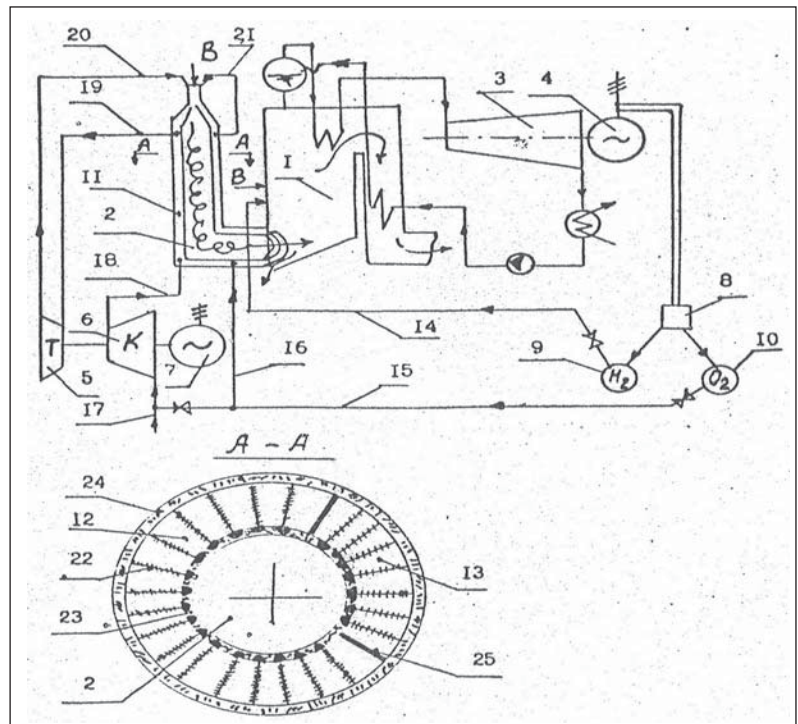
Вищенаведені міркування стосовно необхідності модернізації об’єктів теплової енергетики шляхом їх оснащення обладнанням для газотурбінних установок, які мали б працювати на заміниках газотурбінного палива [2; 5], зокрема, на думку автора цитованої роботи, на попутних газах, синтез-газі в суміші з воднем або на продуктах газифікації кам’яного вугілля. Для ефективного використання парогазотурбінних установок, що працюватимуть на твердому паливі (вугілля низької якості), необхідне створення досконалих систем його газифікації та очищення

отриманої газової суміші від механічних домішок і шкідливих компонентів. Частково такі системи створені провідними спеціалістами інституту вугільних енерготехнологій НАН України та описані в колективній монографії [7]. На думку авторів [2, 7], ККД комбінованих ПГТУ може сягати значень 50–60%, але для цього також ще потрібна реконструкція різного ступеня складності газових турбін і їх камер згорання.

Подальше вдосконалення вищезгаданої комбінованої енергетичної установки [10] призвело до розділення міжкорпусного об'єму додаткової топки циклонного типу на дві частини – азотний і кисневий відсіки, крім того, характерною відмінністю додаткової циклонної топки є наявність теплових трубок, які пронизують її перегородку (див. рис. 2а, б).

Особливість цієї енергетичної установки (рис. 1а, б) полягає в тому, що отримані продукти розділення атмосферного повітря (збагачена суміш киснем та азотна фракція) використовуються для різних цілей. Збагачене киснем атмосферне повітря нагрівається в теплообміннику-регенераторі 11 відхідними газами турбіни 3 по лінії 21 і потрапляє в кисневий відсік 8 додаткової топки, після наступного перегріву подається на запалювання пилоподібної суміші. Азотна фракція атмосферного повітря після охолодження в холодильнику 10 по лінії 15 потрапляє в азотний відсік 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. Нагрітий кисень інтенсифікує процеси горіння в додатковій топці, а значно менша наявність у ньому азоту запобігає утворенню оксидів азоту, чим досягається значне зниження їх викидів.

Дещо по-іншому вирішена проблема зменшення викидів, зокрема викидів оксидів азоту, і подачі на спалювання атмосферного повітря, збагаченого киснем, Д.Н. Грінченком, М.П. Куликом [11]. Принципова схема цієї енергетичної установки зображена на рис. 3.



**Рис. 3. Схема комбінованої енергетичної установки з повітряним і кисневим відсіками в додатковій топці, а також блоком розділення води:**

- 1 – основна топка котла; 2 – додаткова топка; 3 – парова турбіна;
- 4 – електрогенератор; 5 – газова турбіна; 6 – компресор;
- 7 – генератор ГТУ; 8 – блок розділення води; 9 – газгольдер-накопичувач водню;
- 10 – газгольдер-накопичувач кисню;
- 11 – сорочки охолодження додаткової топки; 12 – повітряний відсік додаткової топки; 13 – кисневий відсік; 14 – лінія скиду водню в основну топку;
- 15 – лінія подачі кисню на всмоктування компресора; 16 – лінія подачі кисню в кисневий відсік сорочки;
- 17 – лінія всмоктування компресора; 18 – викид компресора в повітряний відсік сорочки; 19 – лінія подачі робочого тіла в газову турбіну;
- 20 – лінія скиду газової турбіни в додаткову топку; 21 – лінія виходу кисню з кисневого відсіку на горіння;
- 22 – теплові трубки; 23 – теплова ізоляція внутрішньої стінки додаткової топки; 24 – теплова ізоляція зовнішньої стінки додаткової топки; 25 – роздільна стінка відсіків додаткової топки

Оригінальною ознакою вказаної розробки є наявність блоку розділення води на водень і кисень за допомогою електричної енергії, виробленої в момент зменшеного споживання в нічні та літні періоди часу.

Накопичений у газгольдері 9 водень у денний період меншого споживання та в ранішній вечірній години, коли навантаження на основне генеруюче обладнання зростає, подається на спалювання вугілля низької якості в основну топку котельного агрегату. Це дасть змогу основному обладнанню всіх ТЕС більш гладко проходити максимальні пікові навантаження енергосистеми України. Така технологія на тепер широко використовується в передових країнах Європи, зокрема, за усною інформацією випускників

кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій, які працюють у Бранденбурзькому технічному університеті (ФРГ). Отриманий при цьому кисень повертається в атмосферне повітря.

Отриманий при цьому одночасно кисень іде на збагачення атмосферного повітря, що подається як в основну, так і в додаткову топку котельного агрегату. А це гарантує суттєве зменшення оксидів азоту атмосферного походження, що знижує екологічне навантаження на території розташування ТЕС, а також зменшує плату за забруднення навколишнього середовища, оскільки оксиди азоту належать до найвищого класу небезпеки.

**Висновки.** Запропоновані енергетичні установки можуть працювати як за паровим, так і за газовим способами генерації, окремо й в комбінації, тобто в широкому діапазоні зміни потужності, під час нічних провалів накопичувати певні об'єми водню для підняття температури у факелі в процесі спалювання палива низької якості. Збагачення киснем атмосферного повітря знижує об'єми димових газів, а зниження вмісту азоту в суміші, яка надходить на горіння, унеможливає утворення швидких оксидів азоту. За рахунок газової генерації швидкість набору та зниження потужності також зростає, тобто підвищується мобільність енергетичної установки.

### Список літератури:

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/>.
2. Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття або інтенсивне відновлення. Наукові праці. Серія «Техногенна безпека». Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2013. Вип. 198. Том 210. С. 31–38.
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: [mre.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=245239564](http://mre.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564).
4. Савицький О. Спадок ери динозаврів (Огляд теплової енергетики України) / за ред. Олени Міскун. Київ: Вид. Національного екологічного центру України, 2014. 29 с.
5. Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології / Б.Є. Патон, А.А. Долинський, А.А. Халатов та інші. Вісник НАН України (Київ). 2009. № 4. С. 61–69.
6. Дикий Н.О. Газопаротурбинная технология «Водолей»: теоретические основы, технические решения и перспективы их использования. Практика энергосбережения: материалы 4-го Междунар. семинара-практикума. Ялта, 2005.
7. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / І.А. Вольчин, Н.І. Дунаєвська, Л.С. Гапонич та інші. Київ: ТОВ «Гнозис», 2013. 314 с.
8. Кулик М.П., Семчук Я.М. Екологічні та техніко-економічні аспекти спільної роботи парогазотурбінних енергетичних установок. Нафтогазова енергетика: всеукраїнський науково-технічний журнал. 2008. № 1 (6). С. 63–68.
9. Теплова енергетика. Нові виклики часу / за загальною ред. П. Омеляновського та Й. Мисака. Львів: НВФ «Українські технології», 2009. 659 с.
10. Гринченко Д.Н., Кулик М.П. Энергетическая установка. Авт. свид. СССР № 1813884, БИ № 17, 1993.
11. Гринченко Д.Н., Кулик М.П. Энергетическая установка. Авт. свид. СРСР № 1813883, БИ № 17, 1993.

## КОМБИНИРОВАННАЯ ПГТУ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ КАК ЭЛЕМЕНТ БЫСТРОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ УКРАИНЫ

*Енергетика України по причине изношенности технологического оборудования находится в критическом состоянии. Угольные блоки являются источником выбросов вредных веществ в окружающую среду. Предложены две схемы ПГТУ, в которых совмещены паровой и газовый цикл генерации и которые работают на продуктах газификации угля. Использование мембран для разделения воздуха устраняет образование окислов азота.*

**Ключевые слова:** маневренность, мобильность, мембранное разделение воздуха, паровой и газовый циклы генерации.

## COMBINED CYCLE GAS AND STEAM TURBINE UNIT OF A VARIABLE STRUCTURE AS AN ELEMENT OF QUICK OVERHAUL OF HEAT POWER ENGINEERING OF UKRAINE

*Power engineering in Ukraine due to the wear of technological equipment is in critical condition. Coal blocks are sources of emissions of harmful substances into the atmosphere. Two schemes of steam and gas turbine plants, which combine the steam and gas generation cycle, are proposed and work on coal gasification products. The maneuvering of blocks is increasing. The use of membranes to separate air makes it impossible to form nitrogen oxides.*

**Key words:** maneuverability, mobility, membrane separation of air, steam and gas-cycle generation.