

## ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕНСИВНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ НА БАЗІ КОМБІНОВАНИХ ПАРОГАЗОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

**М. П. Кулик<sup>1</sup>, Й. С. Мисак<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail : m\_p\_kulik@ukr.net

<sup>2</sup>Національний університет “Львівська політехніка”;  
79012, м. Львів, вул. С. Бандери 12

Теплова енергетика України базується на вугільних енергоблоках, більшість з яких побудовані у 60-70 рр. минулого століття, та вичерпали свій технічний ресурс, знаходиться в критичному стані. На даний момент часу їх ще використовують для покриття у пікових навантажень, вони працюють в недовантаженому режимі, їх часто зупиняють, через що техніко-економічні показники їх роботи погіршуються, а у навколишнє середовище вони викидають значну кількість шкідливих речовин, будучи у списку лідерів найбільших забруднювачів атмосферного повітря, водних об'єктів та ґрунтів.

Всі технологічні та екологічні проблеми теплової енергетики можна вирішити, наприклад, використовуючи в комбінованій парогазовій енергетичній установці паровий та газовий цикл генерації електричної енергії. Можливі схеми компоновки таких установок запропоновані авторами. Характерною особливістю таких установок є використання для роботи газової частини продуктів спалювання твердого низькоякісного палива, зокрема кам'яного вугілля.

В статті запропоновані різні варіанти формування робочого тіла газових турбін – від передачі тепла із котельного агрегату в контур газової турбіни за допомогою теплових трубок, використання двохступеневого спалювання помеленого вугілля, аж до розділення атмосферного повітря на суміші збагачені азотом і киснем. В останньому випадку перша з них циркулює у газовому циклі, а суміш, збагачена киснем подається на спалювання, чим досягається значне зменшення утворених окислів азоту.

**Ключові слова:** тепла електрична станція, паровий та газовий цикл генерації, двохстадійне спалювання вугілля, додаткова топка, мембранні технології розділення повітря, парогазотурбінна установка, маневреність та мобільність вугільних енергоблоків, екологічна безпека, тепла трубка,

**Вступ.** Електрична енергія є досить важливим ресурсом, який визначає енергетичну безпеку розвиненої держави, а її виробництво є потужним джерелом техногенної небезпеки. Кількість, якість та собівартість виробленої такої енергії слід вважати необхідною умовою успішного розвитку економіки будь-якої держави. Енергетика України базується на генеруючих потужностях гідро- та гідроакумуючих станцій, теплових та атомних електростанцій, а також у незначній мірі на альтернативних та відновлювальних джерелах генерації. За висновками експертів різного рівня, як вітчизняного та міжнародного, енергетична галузь України, зокрема тепла енергетика знаходиться в критичному стані [1, 2]. Це зумовлено позаграничним фізичним зношенням досить старого технологічного обладнання (на даний момент майже 90% вугільних блоків), а також диспропорцією між базовими, напівпіковими та піковими потужностями засобів генерації. Економіка України переобтяжена енергоємними виробництвами первинної переробки сировини різної природи з нерівномірним характером споживання електричної енергії.

Базова частина графіка навантажень покривається атомними та тепловими електростанціями, а потужностей гідро- та гідроакумуючих електростанцій (близько 10% установленної потужності об'єднаної енергосистеми) зовсім недостатньо [3, 4] для покриття пікових навантажень. Тому основний тягар стосовно такого покриття припадає на теплові станції з вугільними блоками.

Робота вугільних блоків в пікових режимах характеризується низькими економічними показниками з одного боку, а з другого – в таких перехідних режимах значно зростає кількість утворених шкідливих речовин, які викидаються в навколишнє середовище. А плата за такі викиди суттєво погіршує техніко-економічні показники підприємств теплової генерації.

**Аналіз стану вирішення існуючих проблем.** Крім парового циклу генерації електричної енергії, відомий і газовий цикл генерації, однак не дивлячись на розвинуте в Україні газотурбобудування, парогазові установки не знайшли широкого використання в енергетиці України. Слід зауважити, що понад 65% електрогенерувальних потужностей у багатьох країнах світу, введених останнім часом базуються газотурбінних технологіях. Парогазові установки входять до складу газотурбінні ТЕС, в тому числі і малої потужності, мають значно вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) та надійні в експлуатації. Провідні компанії в сфері газотурбінного машинобудування (США, Японії, Німеччини, та навіть Швейцарії та Росії) не тільки випускають паро газові установки, але й створили досить розгалужену мережу сервісного обслуговування. За прогнозами науковців інституту технічної теплофізики НАН України [5] в період 2006-2016 рр. суттєво зросте кількість як випущених ГТУ, та ріст ГТУ із надпотужними газовими турбінами. Газові енергетичні

установки мають досить високий ККД (в діапазоні 55-60%), низькі витрати палива на одиницю виробленої енергії, а також характеризуються низькими викидами в атмосферу двоокису вуглецю, та шкідливих оксидів азоту і вуглецю.

Останнім часом, вчені передових країн світу, в тому числі і України, зосереджені на розвитку газотурбінних установок, які працюють за складними термодинамічними циклами (регенеративний, проміжним охолодженням повітря при стискуванні, підігрівом продуктів згорання в процесі їх розширення, подача пари в проточну частину газової турбіни (технологія "STIG"), подача пари й утилізація води в конденсаторі (технологія "Водолій"), бінарний повітряний цикл та інш.). Особливе місце в плані перспективності енергетичних установок може зайняти комбінований парогазовий цикл, однак дороговизна рідкого газотурбінного палива та стрімке зростання цін на газове паливо, в тому числі і на природний газ, стримують широке впровадження газотурбінних технологій.

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

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

**Вибір напрямку вирішення існуючих проблем.** Оновлена "Енергетична стратегія України на період до 2030 року" не вирішує існуючих в енергетиці України проблем стосовно створення додаткових маневрових потужностей та зменшення дефіциту пікових потужностей, який на 2025 рік прогнозується на рівні 1,5-4 Гвт [4]. З врахуванням останніх змін, що не ведуть до поліпшення, у сфері теплової енергетики за висновками експертів [3], для стабілізації ситуації стосовно стійкості ОЕС України в межах необхідної якості електричної енергії доля маневреної потужності об'єктів генерації має складати не менше 20-30% потужностей системи. Для цієї мети цілком підходять комбіновані парогазові енергетичні установки, які можуть працювати навіть на продуктах газифікації твердого палива, зокрема кам'яного вугілля в тому числі і вугілля низької якості власного видобутку. Реалізуючи технологію двох- і навіть трьохстадійного спалювання з використанням циклонних передтопків та циркулюючого киплячого шару (ЦКШ), можна досягти еко-

логічних стандартів по викидам шкідливих речовин в атмосферне повітря. Робоче тіло для газової частини формується у між корпусному об'ємі циклонного передтопка.

**Можливі шляхи вирішення поставленого завдання.** Переведення теплової енергетики на комбіновані парогазотурбінні установки з метою збільшення пікових потужностей, а також дефіцит дорогого газоподібного чи рідкого газотурбінного палива вимагає використання для роботи газової частини енергетичного вугілля. Його якість в недалекій перспективі буде погіршуватися, в той же час вимоги по екологічності енергетичних установок у зв'язку з процесом гармонізації вітчизняного екологічного законодавства з європейським, будуть більш суворішими. Це ставить на сучасному етапі перед науковцями двоєдину і взаємовиключаючу завдання, яке можна сформулювати наступним чином:

- перевести газову частину комбінованої парогазотурбінної установки на тверде паливо,
- спалюючи все більше вугілля низької якості зменшити рівень екологічної небезпеки без суттєвого погіршення техніко-економічних показників окремо взятого блока.

Вирішення такого завдання можливе на основі найсучасніших досягнень науки та технологічних новинок відомих світових та вітчизняних розробників [6]. У згаданій колективній монографії приведена класифікація комбінованих енергетичних установок із паровими та газовими турбінами, в тому числі згадуються парогазові установки на твердому паливі.

На рис. 1 приведена узагальнена блок – схема комбінованої енергетичної установки, яка має у своєму складі паровий цикл і газовий цикл генерації електричної енергії.

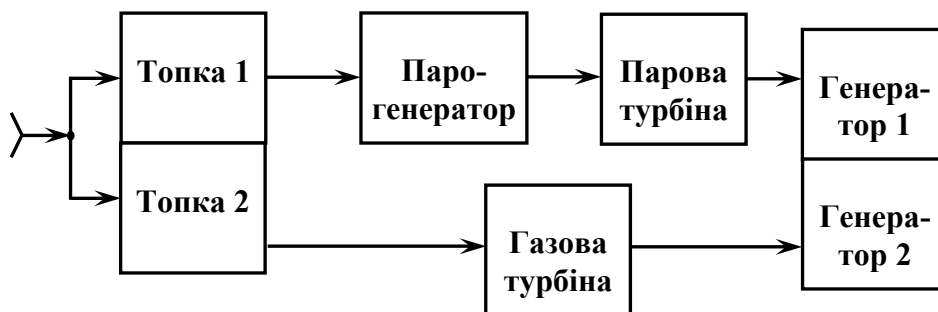


Рис. 1. Блок-схема виробництва електроенергії на базі паротурбінної і газотурбінної установок

Детально така схема розглянута в роботі [7], в якій проаналізовані можливі коефіцієнти корисної дії парової і газової частини. У паровому циклі нараховується чотири етапи перетворення скритої енергії твердого палива, а в газовій частині – таких етапів лише три. За умови близь-

кості к.к.д. окремих блоків парової та газової частини загальний к.к.д верхнього ланцюжка для парової генерації буде значно менший (чотири множника) від такого ж коефіцієнта нижнього ланцюжка для газової генерації (три множника). Якщо початкові теплові потоки обох ланцюжків будуть приблизно однакові, а така ситуація досягається досить легко, то з врахуванням діапазонів коливання коефіцієнтів корисної дії парової частини (30-45%) та газового циклу генерації (50-55%), загальний коефіцієнт корисної дії комбінованої парогазотурбінної енергетичної установки буде заходитися в діапазоні 40-50% (як мінімум).

Однак, тут слід зауважити, що такий досить високий к.к.д. на теперішній момент не мають працюючі теплові електростанції, які скомпоновані по блочній схемі з використанням вугільних блоків. Поєднання традиційного паросилового циклу із газотурбінними установками (ГТУ), МГД-генераторами чи термоемісійними перетворювачами забезпечує підвищення к.к.д. енергетичних блоків на 10-25% (що рівнозначно підвищенню їх потужності), що приводить до скорочення питомих валових викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря.

Найбільш просто паровий цикл генерації електричної енергії поєднується із газовим циклом. При цьому, традиційно для роботи парогазової установки використовується спеціальне газотурбінне паливо (або природний газ), яке є зазвичай досить дорогим та дефіцитним.

Ще в середині ХХ-го століття німецькі винахідники [8] запропонували скерувати продукти спалювання вугілля в газовий цикл. Але при цьому навіть за умови високоефективного очищення продуктів спалювання від твердих включень надійність роботи газової турбіни буде високою.

Газотурбінні установки можуть працювати, як по так званому відкритому процесу, коли в компресор поступає повітря із навколишнього середовища, а відпрацьовані продукти спалювання викидаються в атмосферу, так і по замкнутому процесу, коли робочим тілом таких процесів є спеціально підібраний газ (наприклад атмосферне, збагачене азотом, або інший газ чи їх суміш, що характеризується високою теплоємністю). Нагрітий газ поступає в газову турбіну, де виконує роботу розширення, після чого через регенератор після охолодження поступає знову в компресор, а далі в котельний агрегат для повторного нагріву. Такий замкнутий процес має ще одну важливу перевагу, яка полягає в тому, що найменший тиск в циклі може бути декілька разів більшим за атмосферний, що забезпечує при одних і тих же степенях стискування значно менший об'єм газу та геометричні розміри компресора та газової турбіни.

Крім того, другою перевагою замкнутої схеми є можливість кращого регулювання установки, особливо при змінних режимах її роботи. Це досягається простою зміною кількості тепла, яке використовується у всіх процесах циклу. Така передача тепла із топки котельного агрегату в

контур газової турбіни є теж не дуже ефективною через те, що нагрів проміжного робочого тіла здійснюється шляхом теплопередачі через стінку, а також конвективним теплообміном.

В теперішній час досить широке поширення в різних галузях техніки отримали такі теплопередавальні пристрої, як теплові трубки. Спеціалісти різних наукових напрямків виявляють досить велику зацікавленість до теплових труб, особливо в аспекті їх використання в тепловій енергетиці. Теплова трубка представляє собою замкнутий випарювально-конденсаційний пристрій, в якому переніс тепла від зони випаровування в зону конденсації здійснюється за рахунок прихованого тепла фазового переходу, а повернення конденсату – за рахунок капілярних та гравітаційних сил. Багаточисленні експерименти показали високу ефективність теплових труб та пристроїв на їх основі, а також сприяли значному розширенню представлень про шляхи вдосконалення їх теплофізичних параметрів, підвищенню питомих характеристик і розширенню номенклатури конструктивних варіантів схем їх конкретного використання.

В роботі [9] запропоновані варіанти використання теплових труб, як передавальних пристроїв, для передачі тепла із топки котельного агрегату в зону нагріву проміжного робочого тіла, що буде циркулювати в газовій частині комбінованої парогазотурбінної енергетичної установки.

Раніше було показано, що енергетична установка, що включає в себе паротурбінну установку з котельним агрегатом, пароперегрівачем і паровою турбіною з електрогенератором, а також парогазову установку, що включає в себе повітряний компресор, камеру згорання і газову турбіну зі своїм електрогенератором, є значним джерелом викиду шкідливих речовин в навколишнє середовище. Причому, токсичні речовини виділяються як в паротурбінній частині, так і в газотурбінній частині енергетичної установки. В останній джерелом виділення шкідливих речовин є камера згорання, де відбувається спалювання газоподібного чи рідкого палива, а потім підігрів стиснутого в компресорі повітря до високих температур.

Крім того, враховуючи значно вищі температури робочого тіла в газовій частині, виділення таких шкідливих речовин, як оксиду азоту і оксиду вуглецю, значно вище на одиницю потужності, ніж в паровій частині енергетичної установки, що розглядається.

Найбільш простий і ефективний спосіб усунення цього джерела виділення токсичних речовин полягає в тому, що камера згорання в газовій частині такої установки замінюється камерою нагрівання, а для нагрівання стиснутого повітря використовується такий ефективний теплопередавальний пристрій, як тепла труба

Авторами роботи [10] запропонована енергетична установка, яка складається із парового котла з конвективним газоходом, повітряної ту-

рбіни з компресором та включеної між ними камери підігріву, що зв'язана через теплопередавальний пристрій з топкою котла.

Теплопередавальний пристрій виконаний у вигляді теплової трубки, холодний кінець якої розташований в камері підігріву повітря, а гарячий – в топці котла, причому котел доповнений байпасною лінією, яка включена між газоходом і топкою в місці розташування гарячого кінця теплової трубки.

Принципова схема такої енергетичної установки приведена на рис. 2.

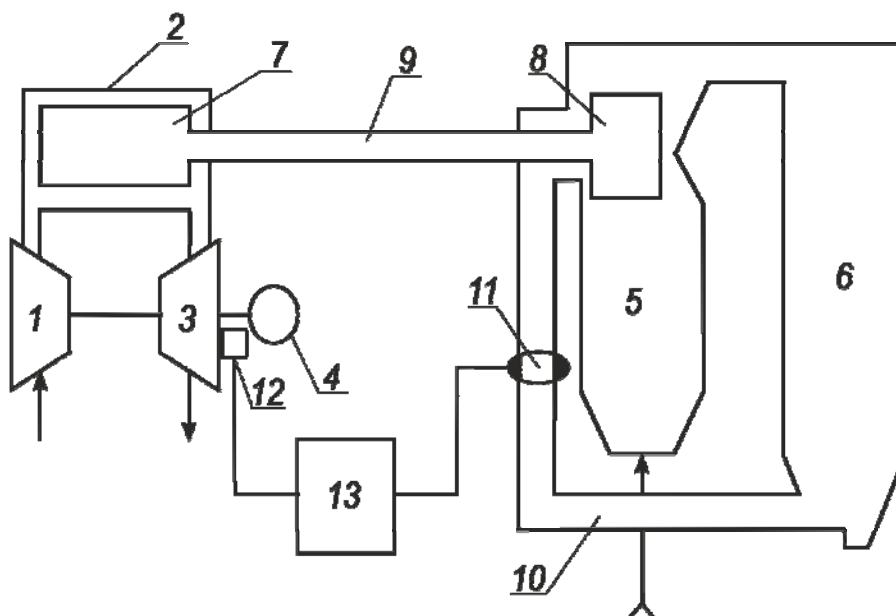


Рис. 2. Принципова схема енергетичної установки з тепловою трубою

Компресор 1 з'єднаний через камеру 2 підігріву повітря з повітряною турбіною 3, вал якої механічно зв'язаний з електричним генератором 4. Паровий котел з топкою 5 і конвективним газоходом 6 з'єднаний з паровою турбіною і своїм окремим електричним генератором дещо іншої потужності (на схемі не показані). Камера 2 з'єднана з котлом за допомогою теплопередавального пристрою, який виконаний у вигляді теплової трубки, холодний кінець 7 якої розташований в камері 2, а гарячий кінець 8 – в топці 5 котельного агрегату. Гарячий та холодний кінець теплової трубки з'єднані між собою трубопроводом 9, який заповнений капілярно-пористим матеріалом, який забезпечує ефективну теплопередачу. Газохід 6 з'єднаний байпасною лінією 10 з топкою 5 котла в зоні розташування гарячого кінця 8 теплової трубки. На початковій ділянці байпасної лінії 9 встановлений додатковий димосмок 10 з привідним електродвигуном 11. На валу електрогенератора 4 встановлений тахогенератор 12, з'єднаний з блоком керування 13, який підключений по виходу також до привідного двигуна 11. Замість димосмока до поча-

ткової ділянки байпасною лінії 10 може бути підключений дуттєвий вентилятор, який також з'єднується з привідним двигуном.

Стиснуте компресором 1 повітря подають через камеру 2 підігріву в повітряну турбіну 3. В топці 5 парового котла спалюють тверде паливо низької якості, а отриману в котлі водяну пару направляють в парову турбіну для генерації електричної енергії по загальноприйнятій схемі. Тепло, яке отримане в топці 5 котла, передають за допомогою теплової трубки повітря, що проходить по камері 2. Повітряна турбіна 3 працює лише у випадку пікового навантаження. За допомогою тахогенератора 12 заміряють оберти турбіни 3, і сигнал від нього поступає на блок керування 13, який зв'язаний з привідним двигуном 11 димосмоку 10. У випадку зменшення навантаження або при зупинці турбіни 3 зменшується вихідний сигнал Тахогенератора 12, а блок керування 13 видає команду на збільшення обертів приводного двигуна 11, і димосмок на лінії 10 подає більшу кількість газів з низькою температурою із газоходу в зону розташування гарячого кінця 8 теплової трубки, чим запобігається її перегорання, що підвищує не тільки надійність установки, а і збільшує кількість тепла, яке відбирається від камери.

Таким чином, описаним вище способом регулюють процес зміни кількості тепла, що передається в камеру 2 шляхом охолодження гарячого кінця 8 теплової трубки, чим розширюється діапазон регулювання потужності турбіни 3, а отже і всієї енергетичної установки.

Слід звернути увагу на той факт, що робота повітряної турбіни забезпечується без спалювання газоподібного чи рідкого палива в камері згорання газової турбіни ПГУ, що зазвичай робиться у відомих установках. Вище вже було показано, що коефіцієнт корисної дії схеми виробництва електроенергії по традиційній схемі складається із чотирьох множників, кожний з яких відповідає ефективності відповідного етапу. При виробництві електроенергії за допомогою газових турбін таких етапів дещо менше (іх тут тільки три). Тому, навіть при рівності коефіцієнтів корисної дії загальний добуток буде суттєво вищий. При паралельному поєднанні обох варіантів, загальний к.к.д буде вищий за к.к.д. традиційної схеми. Внаслідок того, що в топці котельного агрегату кількість палива, що спалюється, може залишитися без змін, або в гіршому випадку збільшується незначно, а виробництво електричної енергії зросте при скромних оцінках тільки на 10% за рахунок утилізації тепла, що раніше викидалось з димовими газами, то в значній мірі зменшується питомий об'єм утворених шкідливих речовин (тобто викиди на 1Мвт потужності), а також зменшується теплове забруднення навколишнього середовища.

Друге технічне рішення [11] представляє собою енергетичну установку, яка складається з парового котла, газової турбіни і компресора з камерою підігріву повітря, що розташована між ними, і в якій поміщений конденсатор теплової трубки, випаровувач, якої знаходиться в топці



парового котла (тобто повністю повторює всі основні конструктивні елементи енергоустановки за авт. свід. СРСР № 1188338). Запропонована енергетична установка додатково обладнана сервомотором з черв'яковою передачею, жорстко зв'язаною з корпусом теплової трубки, випарувувач та конденсатор якої охоплені сальниковими ущільнювачами, які розташовані в корпусі котла і в камері підігріву повітря, а серводвигун, що приводить в рух черв'якову передачу, з'єднаний через блок керування з тахогенератором, який встановлений на валу газової турбіни, яка виконана з розрізним валом (див. рис. 3)

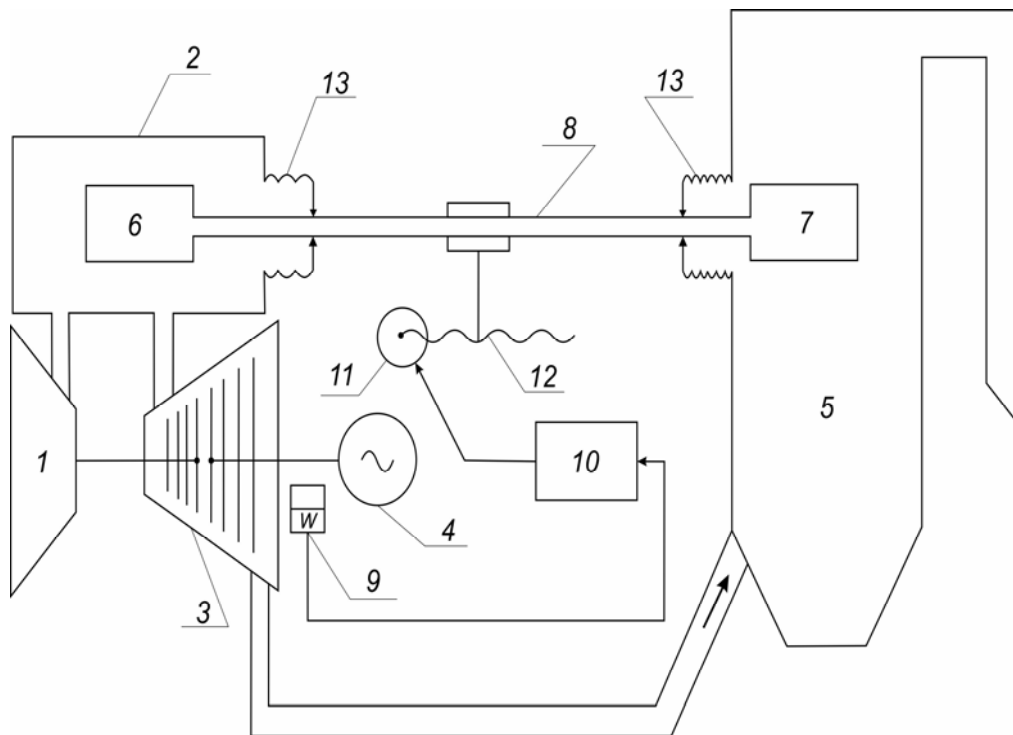


Рис. 3. Схема ПГТУ з газорегульованою тепловою трубкою

Установка складається із компресора 1, камери 2 підігріву газу, газової турбіни 3 з генератором 4 на його вихідному валу та парового котла. Камера 2 термодинамічно зв'язана з топкою котла 5 за допомогою теплової трубки, причому в камері 2 розташований конденсатор 6 теплової трубки, а в топці парового котла 5 – її випарувувач 7, які з'єднані між собою корпусом 8.

На валу генератора 4 встановлений тахогенератор 9, який зв'язаний через блок 10 керування з серводвигуном 11, який приводить в рух черв'якову передачу 12, яка жорстко з'єднана одним своїм елементом з корпусом 8 теплової трубки. Остання герметично закріплена в стінках камери 2 і котла 5 за допомогою сальфонів 13. Вал 14 газової турбіни 3

виконаний з розрізним валом, причому одна частина валу зв'язана з компресором 1, а інша – з генератором 4.

В топці парового котла 5 спалюють низькоякісне паливо, продукти згорання якого генерують перегріту водяну пару, а крім цього, тими ж газами факелу нагрівається випаровувач 7 теплової трубки, яка передає тепловий потік в камеру 2 підігріву газу (повітря), в якій розміщений конденсатор 6 цієї ж теплової трубки. Компресор 1 стискає повітря і подає його в камеру 2, де газ, в даному випадку – повітря, обдуваючи конденсатор 6 теплової трубки, нагрівається до високих температур (1000-1200<sup>0</sup>С). Стиснуте та нагріте повітря направляють в газову турбіну 3, де воно розширюється і крутить генератор 4, виробляючи при цьому певну кількість електроенергії.

Тахогенератор 9 видає інформацію про зміну обертів генератора у випадку зміни навантаження. Ця інформація поступає в блок 10 керування, який в залежності від знаку різниці видає відповідну команду серводвигуну 12 на переміщення теплової трубки (подачу її в топку чи висунення із неї). Так, при зниженні навантаження ланцюг: тахогенератор – блок керування – серводвигун з черв'яковою передачею пересуває теплову трубку, всовуючи її в топку котла 5, в зону з більш високими температурами газів. Температурний напір між газами і поверхнею теплообміну конденсатора 6 збільшується, підвищуючи тепловий потік, що передається від факела топки до повітря (до появи явища запирання в тепловій трубці). При цьому підвищується температура повітря в камері 2 підігріву повітря, хоч і не значно. Необхідні глибокі зміни потужності отримують, в основному, за рахунок зміни витрати повітря, що проходить через компресор і через поверхню конденсатора 6, з якого при цьому, знімають додатковий тепловий потік, що стало можливим завдяки переміщенню випаровувача 7 теплової трубки в топку. А зміна витрати повітря через конденсатор 6 досягається шляхом зміни кількості обертів компресора – це дозволяє газова турбіна з розрізним валом 14.

При зменшенні навантаження всі описані вище процеси відбуваються в зворотному порядку.

Таким чином, переміщення теплової трубки в топці котла 5, а також виконання газової турбіни з розрізним валом дозволяє змінювати в широких межах тепловий потік, що передається з топки парового котла 5 в камеру 2 підігріву газу, і тим самим змінювати в широкому діапазоні потужність електричного генератора. Це дозволяє використовувати запропоновану енергетичну установку в пікових режимах, причому не стільки для покриття прогнозованих пікових навантажень, але приймаючи до уваги досить швидкий набір номінальної потужності в газовій частині ПГТУ, така установка може знайти широке використання і для покриття не прогнозованих або стихійних чи аварійних пікових навантажень.

Потреба в таких пікових навантаженнях може виникнути при різноманітних аваріях в регіональних чи загальнодержавних енергетичних мережах.

Ще одною досить позитивною рисою описаних вище енергоустановок, що розроблені колективом за участю автора є і те, а можливо і в значно більш масштабних рамках), що для роботи газотурбінної установки (ГТУ), що працює в складі ПГТУ, не використовується додаткова кількість газоподібного чи рідкого і дорогого та дуже чистого палива для підігріву стиснутого повітря в пристрої, який замінює традиційну для газової турбіни камеру згорання.

Кількість спалюваного твердого палива звичайної якості в котельному агрегаті загального призначення в розроблених установках збільшиться не суттєво, а з врахуванням підвищення ефективності передачі тепла, що дозволяє акцентувати увагу на значне зменшення кількості шкідливих токсичних речовин (оксидів азоту та оксиду вуглецю), які вже не утворюються в газовій частині установки.

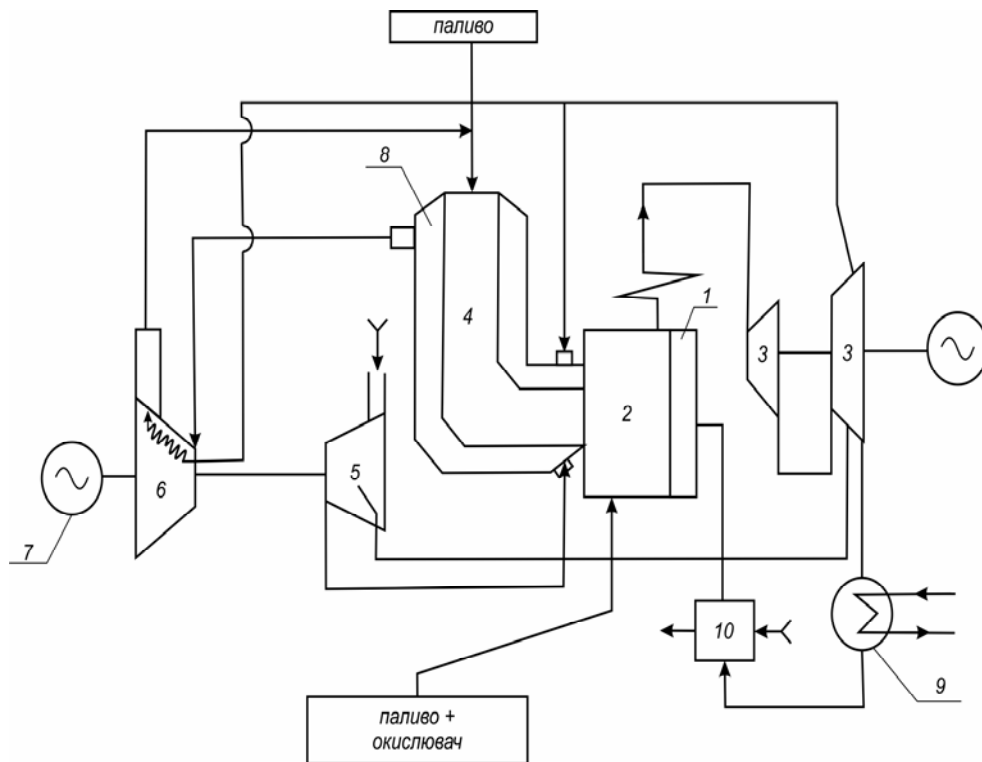
Слід привернути увагу ще на одну принципову конструкцію теплової труби з газорегульованим тепловим потоком. Така труба може змінювати величину теплового потоку що передається від випаровувача до конденсатора шляхом дроселювання газового потоку теплоносія, або зміною потоку рідини, яка направляється в зону випаровування.

Система регулювання теплового потоку в такій тепловій трубці значно спрощується, більш гнучкішою стає робота газової турбіни, а перехідні процеси в часі скорочуються, що позначається і на мобільності енергетичної установки в цілому.

Вже досить давно для зменшення утворення оксидів азоту використовують дво- і триступеневе спалювання палива усіх видів в котельних агрегатах [12], з надлишком 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.

Одна із можливих реалізацій двоступеневого спалювання твердого палива з використанням теплоти, отриманої на першій ступені, для забезпечення роботи газової турбіни, запропонована в роботі [13].

При цьому на початковій стадії використовують в рубашці охолодження додаткової циклонної передтопки формується робоче середовище (нагріте і попередньо стиснуте атмосферне повітря) для роботи газової турбіни. Потоки вугільного пилу можуть перерозподілятися (частина іде в додаткову циклонну передтопку і потрапляє в котельний агрегат, інша частина потрапляє в котельний агрегат минаючи додаткову топку. Принципова блочна схема запропонованої енергетичної установки приведена на рис. 4.



1 – котельний агрегат, 2 – основна топа, 3 – парова турбіна,  
 4 – додаткова циклонна передтопка, 5,6- перша і друга ступінь компресора,  
 7 – електрогенератор ПГУ, 8 – рубашка охолодження циклонного передтопка,  
 9 – конденсатор парового циклу, 10 – водопідігрівач

Рис. 4. Принципова блочна схема енергетичної установки з додатковою циклонною передтопкою

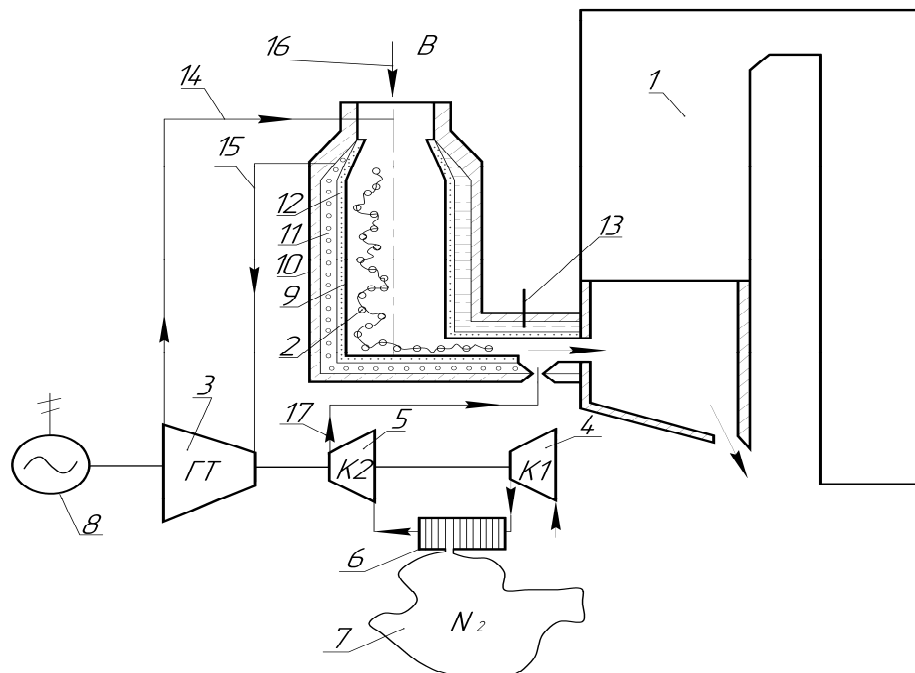
У випадку спалювання в топці котельного агрегату парогазової енергетичної установки меленого вугілля, особливо досить низької якості, або природного газу в вічному режимі (тобто при подачі необхідної кількості атмосферного повітря з певним надлишком, який визначається конструктивними характеристиками пальникових пристроїв, кількість утворення оксидів азоту, що утворюються із атмосферного азоту, не зменшується, а навпаки може зрости через значно вищу температуру у факелі.

При подачі в зону спалювання збагаченого киснем атмосферного повітря зменшується загальний об'єм валових викидів внаслідок подачі меншої кількості атмосферного повітря, а також концентрація оксидів азоту через значно нижчу кількість атмосферного азоту. Такий спосіб в металургії давно відомий та широко використовується у вигляді так званого “кисневого дуття”.

Методам зменшення оксидів азоту в димових газах присвячені роботи багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених [12, 14]. Аналізуючи їх результати можна стверджувати, що утворення оксидів азоту залежить

від таких чинників: конструкція пальників, надлишок атмосферного повітря, висока температура факела, та час перебування палива та окислювача в зоні горіння.

У випадку використання збагаченого киснем атмосферного повітря останній чинник в утворенні оксидів азоту становиться менш вагомим. Принципова схема енергетичної установки з мембранним розділювачем повітря [15] приведена на рис. 5.



1, 2 – основна і додаткова топка, 3 – газова турбіна, 4, 5 – перша і друга ступінь компресора, 6 – мембранний розділювач повітря, 7 – газгольдернакопичувач азоту, 9 – електричний генератор газової частини

Рис. 5 Схема парогазової установки з мембранним розділювачем повітря

Враховуючи той факт, що спостерігається тенденція до погіршення якості вугілля, а джерелом утворення оксидів є атмосферний азот, то в перспективі викиди оксидів азоту будуть тільки збільшуватися.

Запропонована авторами [15] енергетична установка (див. рис. 5) з мембранним розділювачем повітря забезпечує не тільки високу маневреність та мобільність енергоблоку, а і суттєве зниження утворених та викид оксидів азоту по причині відсутності достатньої кількості азотної сировини для їх утворення.

Необхідність переводу великої енергетики на комбіновані парогазотурбінні установки для підвищення мобільності в плані покриття пікових навантажень, та суворі вимоги по екологічності енергетичних установок, а з другого боку – дороговизна газотурбінного палива (газо-

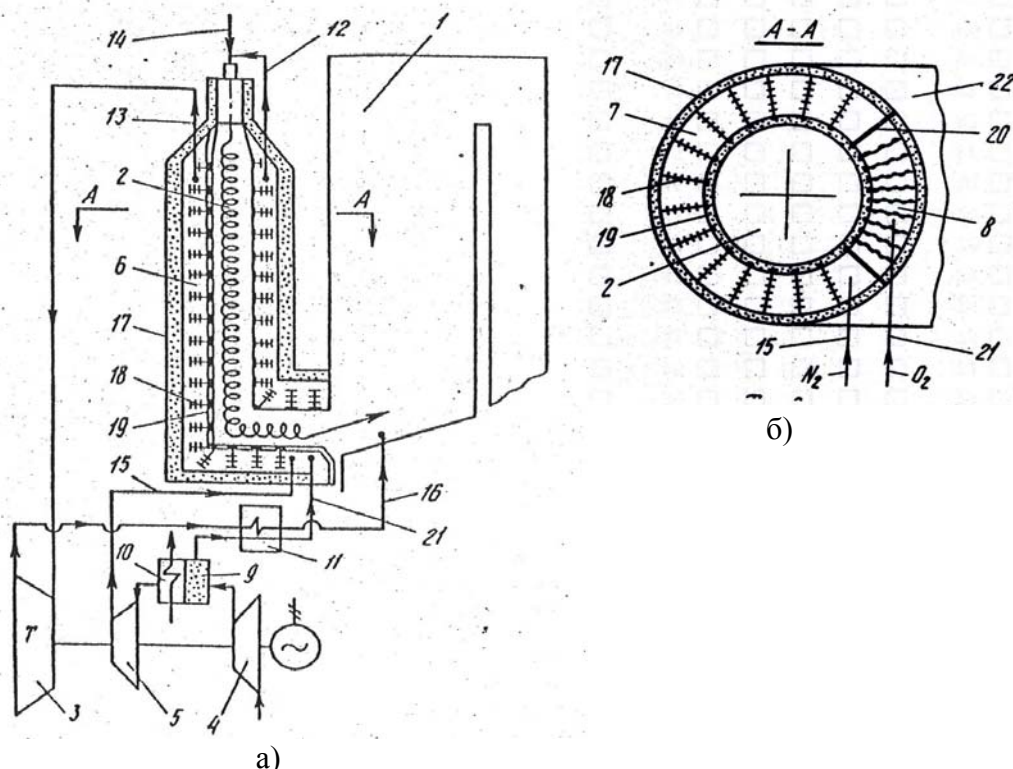
подібного чи рідкого) та погіршення якості енергетичного вугілля ставить перед сучасними науковцями двоєдину і взаємовиключаючу задачу:

- 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.

Вищеприведені міркування стосовно необхідності модернізації об'єктів теплової енергетики шляхом їх оснащення обладнанням для газотурбінних установок, які мали би працювати на заміниках газотурбінного палива [16], зокрема на думку автора цитованої роботи на попутних газах, синтез-газі у 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 ведучими спеціалістами інститут вугільних енерготехнологій НАН України та описані у колективній монографії [17]. На думку авторів [16, 17] коефіцієнт корисної дії комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок (ПГУ) може сягати значень 50-60%, але для цього також ще потрібна реконструкція різного ступеня складності газових турбін, їхніх камер згорання. Переважна більшість технологічних розробок, пов'язаних з технологією газифікації вугілля, спрямовані на інтеграцію газифікатора в парогазовий цикл.

Лідерами в даній технологічній сфері, що називається "ПГУ із внутрішньоцикловою газифікацією (ВЦГ)" є наступні зарубіжні фірми General Electric, Siemens і Mitsubishi. Останнім часом під тиском екологічних вимог такі системи доповнюють системами уловлювання вуглекислого газу. Хоча процеси газифікації вугілля промислово освоєні та використовуються з господарською метою більше 100 років, їх застосування для виробництва електричної енергії стало серйозно розглядатися тільки після появи газифікаційних систем, що працюють під тиском, а також потужних газових турбін. Газифікація під тиском є досить ефективною в технологічних схемах із ПГУ, оскільки в цьому випадку знижуються витрати на додаткове стиснення газу перед подачею в камеру згорання газової турбіни [18]. Теплота, яка отримується при газифікації вугілля, утилізується в середині газового циклу генерації. Потужні енергетичні ПГУ з газифікацією вугілля за рубежом експлуатуються вже досить довго. За цей час доведена їх практична ефективність, а також постійно відбувається їх процес подальшого вдосконалення по всіх параметрах, як технологічних, так і екологічних.

Подальше вдосконалення вищезгаданої комбінованої енергетичної установки [15] привело до розділення міжкорпусного об'єму додаткової топки на дві частини – азотний і кисневий [19] відсіки, крім того характерною відмінністю додаткової циклонної топки є наявність теплових трубок, які пронизують її перегородку (див. рис. 6 а,б)



- а)  
 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, 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 – внутрішня і роздільна стінки, 21 – киснева лінія на нагрів, 22 – скид додаткової топки

Рис. 6. Схема комбінованої енергетичної установки з мембранним розділювачем повітря і відсіками(азотним і кисневим)

Особливість цієї енергетичної установки (рис. 6) полягає в тому, що отримані продукти розділення атмосферного повітря (збагачена фракція киснем і азотна фракція) використовуються для різних цілей. Збагачене киснем атмосферне повітря нагрівається у теплообміннику-регенераторі 11 відхідними газами турбіни 3 по лінії 21 попадає у кисневий відсік 8 додаткової топки, після наступного перегріву подається за запалювання пилоподібної суміші. Азотна фракція атмосферного по-

вітря після охолодження у холодильнику 10 по лінії 15 поступає у 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 горінні у додатковій топці, а наявність у ньому значно менше (ніж у звичайному повітрі азоту)запобігає утворенню окислів азоту, чим досягається суттєвий екологічний ефект.

Дещо по іншому вирішена проблема зменшення викидів, зокрема викидів окислів азоту, та подачі на спалювання збагаченого киснем, автоторами роботи [20].

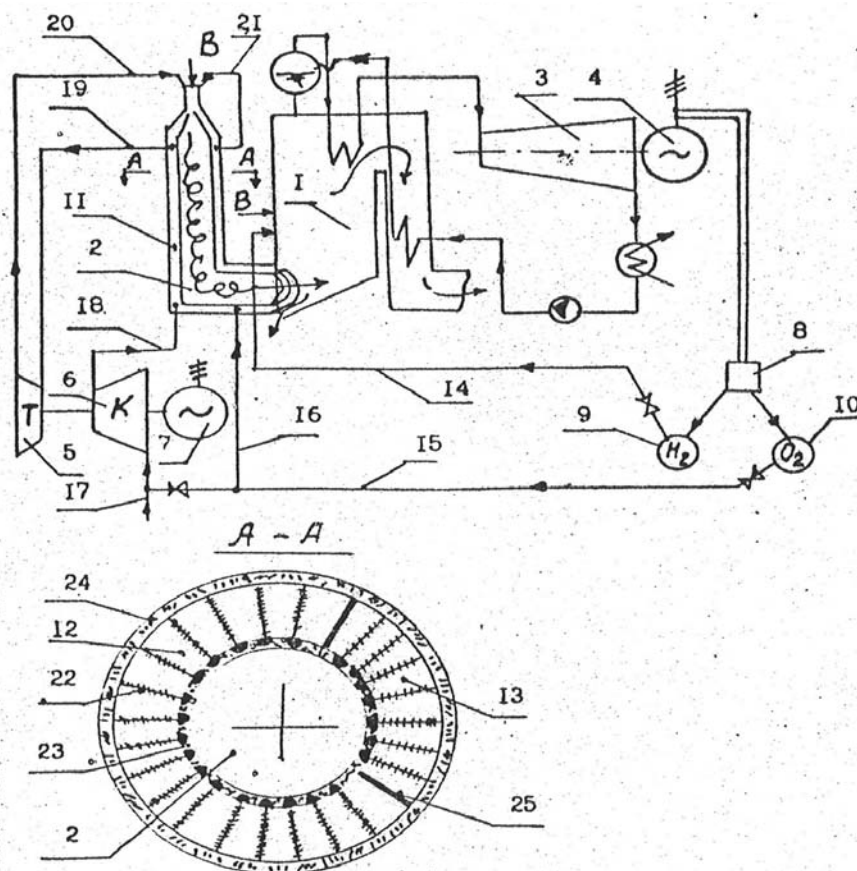
Принципова схема цієї енергетичної установки зображена на рис. 7. Відмінної ознакою вказаної розробки є наявність розділення води на водень та кисень за допомогою електричної енергії, виробленої у момент зменшеного споживання у нічні та літні періоди часу.

Накопичений у газгольдері 9 водень в денний період меншого споживання, в ранішні та вечірні години, коли навантаження на основне генеруюче обладнання зростає, подається на спалювання низькосортного вугілля в основну топку котельного агрегату. Це дозволить основному обладнанню всіх ТЕС більш гладко пройти максимальні пікові навантаження енергосистеми. 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 окислів азоту атмосферного походження, що знижує екологічне навантаження та територію розташування ТЕС, а також зменшує плату за забруднення навколишнього середовища, оскільки оксиди азоту належать до найвищого класу небезпеки із всього переліку газоподібних викидів, які утворюються при спалюванні органічного палива.

**Висновки.** Із викладеного вище витікає наступне. Енергетика України, перебуваючи в критичній ситуації, як в технологічному, так і в екологічному аспекті, має всі необхідні дані – наукові та технічні розробки на високому рівні, проектні і пусконаладжувальні організації, які володіють досвідом проектних, пускових та ремонтних робіт, а також виробничі потужності енергогенеруючого обладнання, для виходу із такого критичного стану. Одним із варіантів технологічного переоснащення об'єктів великої енергетики може бути використання комбінованих парогазових енергетичних установок, які можуть працювати на продуктах газифікації твердого органічного палива, схеми газифікації якого теж розроблені і апробовані в нашій державі.

Для цього необхідно розробити концепцію переоснащення теплової енергетики України, зокрема відкоректувати “Енергетичну програму 2030”, та оперативно віднайти джерела фінансування.





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 – рубашка 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 у кисневий відсік рубашки, 17 – лінія всмоктування компресора, 18 – викид компресора у повітряний відсік рубашки, 19 – лінія подачі робочого тіла у газову турбіну, 20 – лінія скиду газової турбіни у додаткову топку, 21 – лінія виходу кисню із 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

Рис. 7. Схема комбінованої енергетичної установки з повітряним і кисневим відсіками в додатковій топці, а також блоком розділення води

### Література

1. Воронцов С. Про відповідність Енергетичної стратегії України на період до 2030 року сучасним викликам і загрозам у сфері енергетичної безпеки [Електронний ресурс] / С. Воронцов // Національний інститут

- стратегічних досліджень. – Режим доступу: <http://www.niss.gov.ua/articles/470/>
2. Мацевитый Ю.М. Научно-техническое обеспечение долгосрочных планов развития энергетики Украины / Ю.М. Мацевитый, Б.С. Стогний, А.К. Шидловский // Энергетика та електрифікація. – 2013, – №1. – С. 48-52.
  3. 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. Денисевич // Энергетика та електрифікація, – 2008. – № 7. – С. 9-12.
  4. Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття або інтенсивне відновлення / Ю.М. Запорожець // Наукові праці. Серія "Техногенна безпека". – Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили.
  5. Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології. Вісник НАН України / Б.Є. Патон, А.А. Долинський, А.А. Халатов і ін. – К., 2009. – № 4. – С. 61-69.
  6. Энергетика: история, настоящее и будущее. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики / Под ред. В.Н. Клименко, Ю.А. Ландау, И.Я.Сигал. – С. 139-154.
  7. Семчук Я.М. Екологічні та техніко-економічні аспекти спільної роботи парогазотурбінних енергетичних установок / Я.М. Семчук, М.П. Кулик // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №1(6). – С. 65-68.
  8. Парогазова теплосилова установка. Патент ФРН № 839290, 1944.
  9. Кулик М.П. Про можливі енергоощадні підходи в процесі виробництва теплової та електричної енергії / М.П. Кулик // Промислова гідрравліка та пневматика. – 2010. – №1(27). – С. 23-26.
  10. Авт.свід.СРСР № 1198230, БВ № 46, 1985. Грінченко Д.М., Ермакова Л.Ф., Кулик М.П. Енергетична установка.
  11. Авт.свід.СРСР № 1281690, БВ № 1, 1987. Грінченко Д.М., Ермакова Л.Ф., Кулик М.П. Енергетична установка.
  12. Об'єкти теплових електричних станцій. Режимы работы та експлуатації / Й.С. Мисак, Я.Ф. Івасик, П.О. Гут та ін. – Вид. НУ ЛП, 2007. – 255 с.
  13. Авт.свід. СРСР №1188338, БВ № 40, 1985р. Грінченко Д.М., Кулик М.П. Спосіб роботи енергетичної установки.
  14. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И.Я. Сигал. – Ленинград: Недра, 1988. – 312 с.
  15. Патент України № 18 856, БВ №6, 1997р. Пеньков В.І., Грінченко Д.М., Кулик М.П. Енергетична установка.
  16. Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття або інтенсивне відновлення / Ю.М. Запорожець // Наукові праці. Техногенна безпека. – 2013. – Вип.198, том 210. – С. 31-36.
  17. 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. Засядько. – К.: ТОВ "Гнозіс", 2013. – 318 с.

18. Тиматков В. Стратегическое значение технологии газификации угля [Электронный ресурс] / В. Тиматков // Институт проблем естественных монополий. – Режим доступа: <http://www.combienergy.ru/stat939.html>
19. Авт. свид. СССР № 1813884, БИ № 17, 1993. Гринченко Д.Н., Кулик М.П. Энергетическая установка.
20. Авт. свид. СССР № 1813883, БИ № 17, 1993. Гринченко Д.Н., Кулик М.П. Энергетическая установка.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 23.09.2016 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором Семчуком Я.М.,  
д.т.н., професором Грудзом В.Я.*

## PROSPECTS OF INTENSIVE RECOVERY OF THERMAL POWER OF UKRAINE BASED ON COMBINED STEAM AND GAS POWER PLANTS

**M. P. Kulyk<sup>1</sup>, Y. S. Mysak<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str., 15;  
e-mail: m\_p\_kulik@ukr.net*

<sup>2</sup>*National University "Lviv'ska Polytechnika";  
79013, Lviv, Stepan Bandera str., 12; e-mail: m\_p\_kulik@ukr.net*

*Thermal power of Ukraine is based on coal power blocks. Most of them were constructed in 1960-70, exceeded their service life and are in critical condition. Thermal power plants are still used to cover peak loads, they operate in partially loaded regime and are often stopped, hence, operational efficiency worsens, a lot of harmful substances is emitted into the environment making them leading polluters of air, water and soil.*

*All technological and environmental issues of thermal power can be solved, for example, by using steam and gas cycle of electrical power generation in a combined cycle steam and gas power plant. Possible layout schemes of such plants are proposed by the authors. A characteristic feature of these plants is combustion of low-quality solid fuels, particularly coal, for gas unit operation.*

*The article proposed various options of forming operational mixture for gas turbines – including heat transfer from boiler unit into circuit of gas turbine using heat pipes, use of two-stage combustion of finely-ground coal, as well as separation of air into nitrogen and oxygen enriched mixtures. In the latter case, the first of them circulates in the gas cycle, while oxygen enriched mixture is supplied for combustion, thus achieving a significant reduction of nitrogen oxides formation.*

**Key words:** *thermal power plant, steam and gas generation cycle, two-stage coal combustion, additional furnace, membrane air separation technologies, steam and gas turbine power plant, maneuverability and mobility of coal power plants, environmental safety, heat pipe.*