

10.31653/smf343.2021.140-150

Лихогляд К.А., Мусорін М.А. ; Мазур Т.М.
Дунайський інститут НУ «ОМА»

РОЗВИТОК СУДОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Для подолання екологічної кризи в теплоенергетиці повинні відбутися якісні зміни. Найважливішими проблемами перспективного розвитку теплової енергетики є подальше технічне вдосконалення, перехід на принципово нові технології, що забезпечують підвищення економічної та енергетичної ефективності, надійності та екологічної чистоти експлуатації суднових енергетичних установок з мінімізацією викидів в навколишнє середовище до екологічно безпечного рівня.

(Нагадуємо, що з 1-го січня 2020 року вміст сірки (SOx) в паливі не повинно містити більше 0,5%, а викиди парникових газів повинні бути скорочені на 50% до 2050 року, згідно з останнім рішенням Міжнародної морської організації (ІМО) .

Обмеження, введені ІМО (Міжнародна морська організація) на вміст оксидів сірки в судновому паливі, неминуче призведе до серйозних рішень з відшукування альтернативних видів палива та інших технічних реконструкцій на морських судах. Вже очевидно, що перехід з високосірчаного мазуту (3,5%) на дистилат (вмісту сірки 0,5%) не буде одномоментним по всьому світу і, безумовно, додасть роботи морякам. Деякі судновласники встановлюють на судах з ДВС скрубери і продовжують використовувати високосірчистий мазут; деякі, щоб відповідати вимогам, переключаться на мазут з низьким вмістом сірки. Тим часом, є і третій шлях, це шлях відшукування альтернативних видів суднового палива, які зможуть замінити традиційний мазут, які майже не виділяють SOx і дозволяють значно знизити викиди інших парникових газів. Крім того, зростають вимоги до ефективності і к.к.д. суднових енергетичних установок. Назріла необхідність заміни традиційних СЕУ і альтернатива ДВС була і є турбінна енергетика.

Потужним стимулом подальшого розвитку турбінної енергетики стало зростаюче застосування в теплоенергетиці парогазових технологій.

Ідея створення парогазових установок, що використовують в якості робочих тіл продукти згоряння палива і водяна пара, вперше

була висловлена французьким ученим Саді Карно ще в 1824 році в його роботі

«Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу».

Потужності енергоустановок сучасних ПГУ збільшилися до 600 МВт, ККД - до 58%. Впровадження розроблених гібридних установок, що представляють собою поєднання паливних елементів і ПГУ, може дозволити в перспективі досягти к.к.д. до 75% і значно зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Створення і розвиток парогазових і газопарових установок

Проект газопарові установки з подачею води в камеру згоряння і використанням получаючоїся парогазової суміші в якості робочого тіла турбіни був розроблений морським лейтенантом Павлом Дмитровичем Кузьмінським. У 1892 році їм була побудована Газопарові турбіна невеликої потужності. У його установці було застосовано горіння палива (гасу) при $p = \text{const}$ і охолодження продуктів згоряння (перед багатоступеневою радіальною турбіною) шляхом розведення їх водяною парою, т. Е. Установка була газопарові (монарного типу). І горіння, і розбавлення продуктів згоряння паром здійснювалися в одній і тій же камері, яка була названа П. Д. Кузьмінським «газопарородом». Про неї Кузьмінський писав:

«Здійснення газопаророда знаходиться в тісній залежності з побудованої ще в 1894 році частиною турбінної машини-двигуна моєї ж системи, що дає можливість не тільки мати велике розширення суміші продуктів згорання і парів охолоджуючої рідини, а й мати так званий передній і задній хід, тобто . обернути вал то в одну, то в іншу сторону».

Схема турбіни і камери-«газопаророда» зображена на рис.1. Камера згоряння 3 складається з внутрішнього циліндра і зовнішнього корпусу. Між ними розміщений спіральний змійовик 6, через який пропускалася вода, що охолоджує стінки камери згоряння, і потім впорскувалася в її обсяг для охолодження продуктів згоряння.

Утворена в змійовику пара впорскується в камеру згоряння. Суміш пари та газу подавалася на радіальну турбіну, яка здійснювала механічну роботу. Установка призначалася для невеликого катера. Камера згоряння була створена і випробувана. Безпосередньо до камери згоряння примикала радіальна турбіна, що складається з двох дисків - нерухомого з напрямним апаратом і рухомого з робочими лопатками.

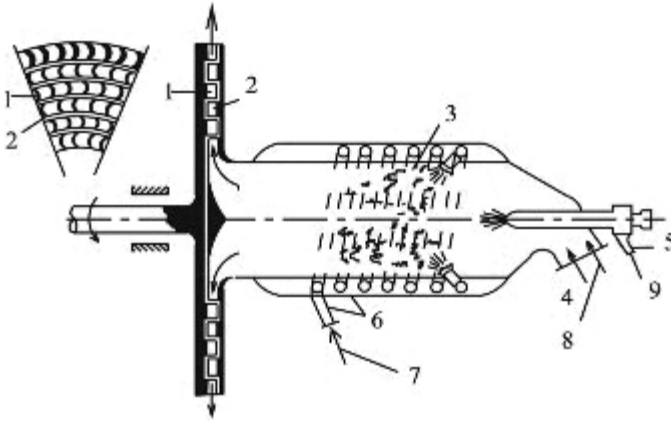


Рис.1.Схема турбіни і камери згоряння П. Д. Кузьмінського

1 - робоча лопатка; 2 - напрямна лопатка; 3 - камера згоряння; 4 - повітряний патрубок; 5 - форсунка; 6 - змійовик; 7- подача води; 8 - підведення повітря; 9 - подача палива

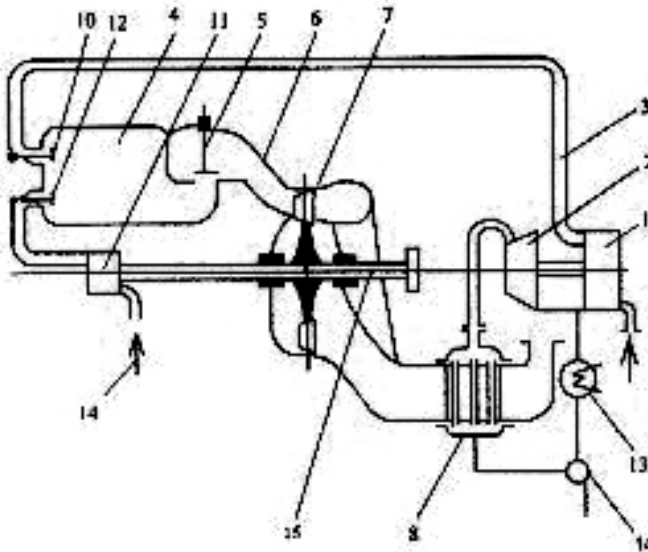


Рис.2. Схема парогазової установки Гольцварта зі згорянням при $V = \text{const}$ потужністю 5 МВт (1920 р)

1 - повітряний компресор; 2 - парова турбіна; 3 - повітропровід; 4 - камера згоряння; 5 - вихлопний клапан; 6 - газоподводящий патрубок турбіни; 7 - газова турбіна; 8 – котел-утилізатор; 9 - вихлопний патрубок установки;

10 - впускний (повітряний) клапан; 11 - паливний насос; 12 - паливний клапан; 13 - конденсатор; 14 - живильний насос; 15 - вал установки.

Багато сил до підвищення ефективності парогазових установок доклав німецький інженер Карл Гольцварт. У 1920 р за його кресленнями для силової станції заводу Тіссена була побудована ПГУ розрахунковою потужністю 5000 кВт (рис. 2). Як видно, у неї повітря подається в камери згоряння ($V = \text{const}$) компресором 1, що має незалежний привід від парової турбіни 2, що живиться парою, що генерується в котлі утилізаторі 8 теплом газів газової турбіни. Вже згадана установка по суті відноситься до ПГУ бінарного типу.

Подальше вдосконалення установок Гольцварта супроводжувалося збільшенням ступеня попереднього стиснення повітря перед подачею його в камери згоряння. Так, якщо в перших установках вона становила лише 0,13-0,18 МПа, то в наступних була доведена до 0,23-0,3 МПа (з підвищенням тиску в кінці згоряння до 1,2-1,4 МПа). Але і в цих агрегатах найбільший досягнутий до 1927 року к.к.д. становив трохи більше 14%, хоча до 1939 році к.к.д. таких установок був доведений до 18-20%.

З 1928 р К. Гольцварт разом з професором В. Шюле розробляє проект нової установки (що отримала згодом назву турбіни Гольцварта-Шюле), яка, крім того, що вона теж була бінарною парогазовою установкою (рис. 3), повинна була працювати за змішаним циклом, що сполучає дві турбіни, одна з яких працювала в циклі зі згорянням при $V = \text{const}$, а друга - при постійному тиску.

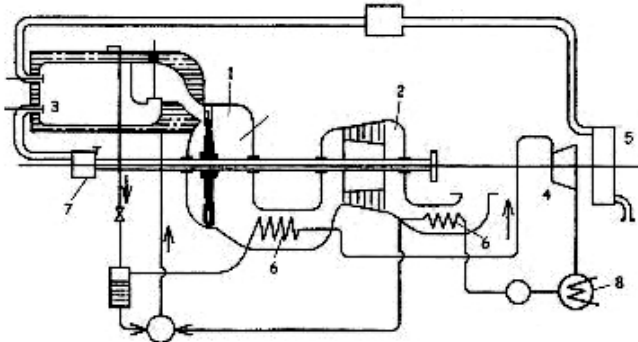


Рис. 3. ПГУ Гольцварта-Шюле зі змішаним циклом (1928-1933гг.)

1 - газова турбіна, що працює в режимі $V = \text{const}$; 2 - газова турбіна, що працює в режимі $p = \text{const}$; 3 - камера згоряння; 4 - парова турбіна; 5 - повітряний компресор; 6 - парогенеруючі поверхні; 7 - паливний насос; 8 - конденсатор

У 1933 році агрегат було встановлено на металургійному заводі в Гамбург (Німеччина) і при роботі на доменному газі показав, за опублікованими даними, к.к.д. до 20% [7].

Газотурбінна установка з парогазовим робочим (контактні ГПТУ) Комбінована ГПТУ (газо-паротурбінна установка) може бути здійснена і іншими способами. У всіх випадках основою установки залишається ГТУ (газотурбінна установка), відмінність полягає в способах ув'язки газової та парової частин установки в загальному термодинамічному циклі. На відміну від раніше розглянутих схем термодинамічно комбінованих ГПТУ, в установках з парогазовим робочим тілом по-іншому організована парова частина циклу: пара подається не в окрему утилізаційну парову турбину, а безпосередньо в проточну частину газової турбіни. Такий тип двигуна називається парогазовою турбіною. Вироблення пари в контактних ГПТУ може здійснюватися в утилізаційних парових котлах, або в більш ширших камерах. Орієнтовна схема ГТУ з парогазовим робочим тілом і розширювальною камерою показана на рис. 4.

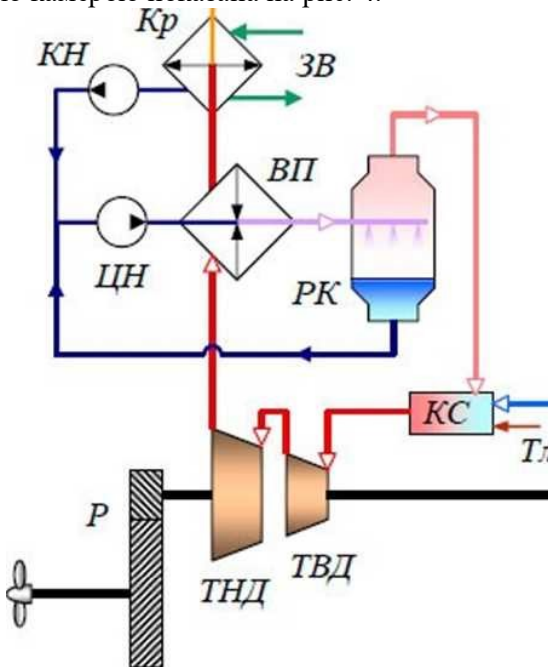


Рис. 4. Схема ГТУ з парогазовим робочим тілом
 К - компресор ВМД, КС - камера згоряння, ТВД - турбіна високого тиску, ТНД - турбіна низького тиску, Р - редуктор,

РК - расширительная камера, ЦН - циркуляційний насос,
В - водопідігрівач, Кр - конденсатор, КН - конденсатний насос, В - забір
повітря з атмосфери, ДГ - викид газів в атмосферу,
ЗВ - забортна охолоджуюча вода, Тл - подача палива.

Основним елементом установки є ВМД (газотурбінний двигун). Його конструкція зазвичай виконується прямоочною з блокованим компресором або з вільною пропульсивною турбіною. У камери згоряння ГТД подається повітря, стиснене в компресорі, паливо, і насичена пара з розширювальної камери. Новоутворена на виході камери згоряння парогазова суміш надходить в проточні частини парогазових турбін, розширюється, здійснюючи корисну роботу, і направляється в водопідігрівач. У водопідігрівачів теплота парогазового робочого тіла передається живильній воді, після чого охолоджена парогазова суміш надходить в парогазовий конденсатор. В конденсаторі відбувається відділення газової фази від продуктів згоряння палива. Теплота парогазової суміші йде в охолоджуючу забортну воду, при цьому водяна пара конденсується і її конденсат накопичується в нижній частині конденсатора, а димові гази видаляються в атмосферу.

Конденсат з конденсатора забирається конденсатним насосом і подається для повторного використання на всмоктування циркуляційного насоса. Циркуляційний насос подає воду через водопідігрівач в камеру розширення. У розширювальній камері при дроселюванні води до тиску в камерах згоряння двигуна відбувається її часткове випаровування, і утворена насичена пара надходить в камери згоряння, а скупчена в нижній частині розширювальної камери не випарувався, вода повертається назад в цикл на всмоктування циркуляційного насоса. Функцією циркуляційного насоса в даній установці є підтримка циркуляції води в контурі РК - ЦН - ВП - РК.

В установках з розширювальними камерами параметри згенерованої пари нижче, ніж в установках з утилізаційними котлами, але при цьому вони мають більш високу паропроодуктивність і, відповідно, більш високі значення витрат робочого тіла через проточну частину парогазової турбіни.

Термодинамічний цикл ГПТУ з парогазовим робочим тілом складається з циклів газової та парової частин установки, які включають в себе наступні процеси (рис. 5):

Водяна частина циклу:

13_п-10_п — охолодження води розширювальної камери при

10_п-9_п перемішуванні з конденсатом;

Пароводяна частина циклу:

13_п-14_п — випаровування живильної води в розширювальній камері;

14_п-4_п — перегрів пари в камерах згоряння ГТД при його перемішуванні з газом;

4_п-5_п — розширення парової складової робочого тіла в парогазовій турбіні;

5_п-6_п — відведення теплоти від парової складової робочого тіла до живильної води в водопідігрівачі;

5_п-6_п — охолодження парової складової робочого тіла в парогазовому конденсаторі до температури конденсації;

6_п-7_п — конденсація парової складової в парогазовому конденсаторі;

8_п-9_п — підігрів утвореного конденсату при перемішуванні його з водою з розширювальної камери.

З метою збільшення ККД циклу і ступеню розширення парогазового робочого тіла в проточній частині турбін можливе застосування спеціальних пристроїв - екстастерів, що дозволяють знизити тиск за останньою сходинкою турбіни до значення нижче атмосферного.

Застосування контактних схем ПТУ дозволяє підвищити ККД газотурбінного і паротурбінного циклів в порівнянні з вихідними циклами ВМД і КТЕУ. Подальше ускладнення схеми контактної ГПТУ помітного вирашу в підвищенні ККД не дає. Використання парогазового робочого тіла завжди пов'язане з певним витоком в атмосферу живильної води, так як здійснити повне відділення парової фази робочого тіла від газової в парогазовому конденсаторі досить складно. Цей недолік парогазової установки призводить до необхідності постійного поповнення запасів живильної води на судні.

Сучасні напрямки підвищення ефективності ПГУ

Парогазові установки повинні мати досить високий ККД. Це забезпечується подальшим розвитком сучасних технологій в галузі морського газотурбобудування, а також перспективних розробок СЕУ.

Існують такі можливі напрями вдосконалення СЕУ:

- подальше зростання початкової температури газу перед турбіною, з урахуванням специфіки роботи ГТУ в морських умовах і тривалого ресурсу, до значень $\sim 1350-1400$ °С;
- подальший прогрес в досягненнях металургії і технології жароміцних і жаростійких сплавів, здатних працювати при температурі понад 950 °С;
- створення надійних термобар'єрних покриттів на основний метал лопаткових апаратів турбіни (особливо в перших щаблях) і елементи камери згоряння, ротора турбіни;
- відпрацювання ефективних і надійних систем повітряного охолодження елементів турбін, що працюють при високих температурах газу;
- ефективна промивка проточної частини компресора, проточних частин камери згоряння і турбіни від солевідкладень;
- використання в тепловій схемі ПГУ двох або трьох рівнів тиску водяної пари в котлі-утилізаторі в конструкції ПТУ.

Аналіз численних публікацій, присвячених застосуванню суднових енергетичних установок (СЕУ) різного конструктивного виконання, дозволяє зробити висновок про те, що, використовуючи технології парогазових установок (ПГУ), можна забезпечити істотне збільшення ККД СЕУ в порівнянні зі звичайними морськими дизельними (ДЕУ), газотурбінними (ГТУ), паротурбінними (ПТУ), ядерними енергетичними установками. Виграш в ККД при цьому може складати орієнтовно 10-15% в залежності від рівня потужності, досконалості ДЕУ, ГТУ і ПТУ, значень теплотехнічних параметрів робочих тіл.

Відомо, що ККД ПГУ перевершує ККД будь-дизельної, газотурбінної, паротурбінної, ядерної СЕУ. На рис. 6 показана схема циклу ПГУ, в якому в високотемпературній частині працює ГТУ (процеси 1-4), а в нижній - ПТУ, з одним і / або двома рівнями тиску пара в парогенераторі. Термічний ККД будь-якого циклу теплового двигуна визначається зі співвідношення

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{T_{с.и}^{ОТВ}}{T_{с.и}^{ПОДВ}} \right) \quad (1)$$

де $T_{с.и}^{ОТВ}$ - середньоінтегральна температура відведеної теплоти;

$T_{с.и}^{ПОДВ}$ - середньоінтегральна температура підведеної теплоти в циклі.

З аналізу циклу ПГУ (рис. 6) випливає, що теплота в процесі 2-3 (горіння палива в камері згоряння ГТУ) підводиться до робочого тіла при високій середньоінтегральній температурі, а відводиться при низькій середньоінтегральній температурі в процесі 4А, що відбувається в конденсаторі ПТУ (при охолодженні пари і конденсату циркуляційною водою), а також відводиться невелика кількість теплоти з вихлопними газами, що йдуть з котла-утилізатора в процесі 5-1. Ці технічні можливості ПГУ забезпечують найбільший ККД в порівнянні з будь-якими іншими СЕУ традиційного конструктивного виконання.

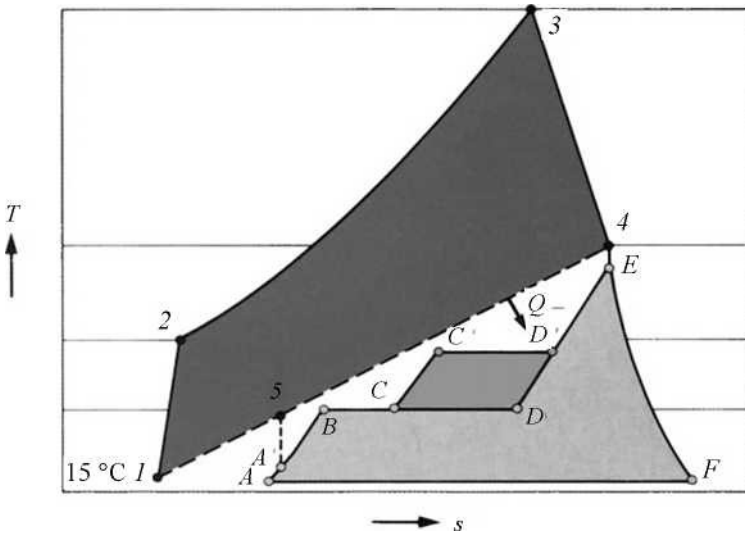


Рис. 6. Схема циклу ПГУ в діаграмі S-T

У практиці створення ГТУ морського типу освоєний рівень початкової температури газу перед турбіною аж до «1250-1300°C при ступені стиснення повітря в компресорі близько 20-23. При цьому температура вихлопних газів на виході з турбіни складає близько 500°C і більше, що прийнятно для створення досить ефективного котла-утилізатора і контура з ПТУ. Відведення теплоти в конденсаторі ПТУ проводиться при температурі близько 40-50 °C (в залежності від температури заборотної циркуляційної води). При цьому будуть забезпечені прийнятні масогабаритні показники СЕУ, досить висока надійність. Доцільно використовувати накопичений великий досвід з стаціонарної енергетики при створенні морських СЕУ.

Найбільший вплив на величину ККД циклу ПГУ надає рівень досконалості ГТУ, і в першу чергу досягається температура газів перед турбіною - ТЗ. Чим вище значення ТЗ, тим більше ККД ГТУ, а також ПГУ, при інших рівних умовах порівняння.

Висновки

1. Для СЕУ слід застосовувати найбільш ефективні двигуни і комбіновані установки, з урахуванням їх конкретних переваг і недоліків, а також специфіки і призначення судна. При цьому слід враховувати, що суднові ПГУ можуть забезпечити найбільш високу економічність, в порівнянні з будь-якими типовими енергетичними установками при прийнятних масогабаритних показниках.

2. Найбільш важливими складовими для досягнення високої економічності ПГУ є високий рівень ККД газової турбіни і висока початкова температура газів перед турбіною. Це досягається в даний час за рахунок передових і надійних систем охолодження вузлів газової турбіни, надійних термобарерних покриттів деталей турбіни, а також шляхом ускладнення контуру ПГУ введенням 2-х або 3-х рівнів тиску пара.

3. Вважається перспективним використання повністю електрифікованих СЕУ (в т. Ч. ПГУ) для багатьох типів суден, що забезпечує ряд технічних і технологічних переваг при експлуатації суден з гребними електродвигунами і гвинтами фіксованого кроку [4].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зисін Л. В. Парогазові і газотурбінні установки. СПб .: СПбГПП, 2010. 378 с.

2. Цанев С. В., Буrows В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбінні і парогазові установки теплових електростанцій. МЕН, 2002. 574 с.

3. Родіонов Н. Г. Про потенційні можливості застосування газових турбін для судових ПГУ // 2017. С. 236-238.

4. . Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2017. №4, Н. Г. Родионов, В. В. Коротков, Е. И. Томашов.

5. Шинкоренко Д. Перспективи розвитку енергетичних установок надводних кораблів ВМС зарубіжних країн // Закордонне військовий огляд. 2007. Ч. 1. № 1. С. 54-61. Ч. 2. № 3. С. 58-61.

6. Болдирев О.Н Суднові енергетичні установки. Комбіновані і ядерні установки. [2007]

7. Плачкова С.Г. Энергетика: історія, сьогодення і майбутнє. 2013, т.3.