



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ ДВИГУНОБУДУВАННЯ

VIII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

05-06 грудня 2024 року



МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

м. Миколаїв ■ 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**СУЧАСНИЙ СТАН
ТА ПРОБЛЕМИ ДВИГУНОБУДУВАННЯ**

VIII Міжнародна науково-технічна конференція

05-06 грудня 2024 року

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, пр. Героїв України, 9

ПАРТНЕРИ КОНФЕРЕНЦІЇ:

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Академія наук суднобудування України
ДП Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»
Колумбійський університет (Нью-Йорк, США)
Корейський науково-дослідний інститут машинобудування і матеріалів (Республіка Корея)
Технологічний університет (Онтаріо, Канада)

Матеріали публікуються за оригіналами, наданими авторами.

Претензії до організаторів не приймаються.

Відповідальний за випуск:

О. А. Гогоренко

С 89 Сучасний стан та проблеми двигунобудування : Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції : – Миколаїв : Іліон, 2024. – 178 с.

ISBN 978-617-534-747-8

У збірнику опубліковані матеріали міжнародної конференції, яка відбулася у Національному університеті кораблебудування (м. Миколаїв) 05-06 грудня 2024 року. Розглянуті науково-технічні досягнення вітчизняних та зарубіжних науковців у галузі розроблення, виготовлення, дослідження та технічної експлуатації двигунів внутрішнього згоряння, газотурбінних, паротурбінних, комбінованих двигунів, а також двигунів інших типів і енергетичних установок, що використовують зазначені двигуни. Зокрема увага приділяється обговоренню інноваційних науково-технічних розробок у сфері новітніх теплових двигунів, стаціонарних і транспортних енергетичних установок. Також серед завдань конференції – пошук шляхів використання альтернативних палив у двигунах і енергетичних установках та вирішення питань підвищення енергоефективності й екологічності стаціонарної та транспортної енергетики.

Матеріали збірника можуть бути корисними для науковців, інженерно-технічних працівників, викладачів, студентів і аспірантів.

УДК 621.43

ISBN 978-617-534-747-8

**© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2024**

Таким чином, розвиток технологій використання теплообмінних апаратів типу box cooler в системах охолодження є актуальним і важливим для подальшого підвищення енергоефективності суднового та стаціонарного енергетичного обладнання, оскільки пропонує інноваційні рішення для забезпечення надійності, зниження виробничих і експлуатаційних витрат, а також мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Література:

1. Wärtsilä Encyclopedia of Marine and Energy Technology, URL: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/boxcooler>
2. Kelvion, "Efficient and space saving cooling", URL: <https://www.kelvion.com/products/category/box-cooler>
3. A. Aijjou, L. Bahatti, A. Raihani, «Enhanced Ship Energy Efficiency by Using Marine Box Coolers», Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 3, no. 6, pp. 83-88 (2018)
4. DNV, "Maritime Forecast to 2050", 2023 edition URL: <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-edition-2023>
5. Курниченко В. «Нова продукція «Цветмета»», Артемівська громадська газета «Вперед», №147 (17080), 24 грудня 2002 року.
6. R.W. Femstrum & Company, "Which marine cooling system is best for your type of vessel" URL: <https://www.femstrum.com/applications/#stationaryapp>

ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА З НУЛЬОВИМИ ВИКИДАМИ НА ОСНОВІ ЦИКЛУ АЛЛАМА

Патлайчук В. М.

канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри турбін
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна

Термодинамічний цикл Аллама – це процес перетворення вуглеводного палива в теплову енергію з уловлюванням утворюваних вуглекислого газу та водяної пари. Основними винахідниками цього процесу є англійський інженер Родні Джон Аллама, американський інженер Джеремі Ерон Фетведт, американський вчений доктор Майлз Р. Палмер та американський бізнесмен і новатор Г. Вільям Браун. Цикл Аллама був визнаний MIT Technology Review у списку 10 проривних технологій 2018 року [1-4].

Працездатність цього циклу було підтверджено на демонстраційній установці компанії NET Power потужністю 50 МВт, яка живиться природним газом, у м. Ла-Порте (штат Техас, США) у травні 2018 року. 15 листопада 2021 року установка успішно синхронізувалася з мережею, підтверджуючи, що цикл Аллама здатний генерувати електроенергію частотою 60 Гц.

Цикл не відноситься до розряду комбінованих циклів (рис. 1). Замість цього він використовує особливі термодинамічні властивості вуглекислого газу як робочої рідини, тим самим усуваючи втрати енергії, з якими стикаються цикли на основі водяної пари через тепло випаровування та конденсації [5-7].

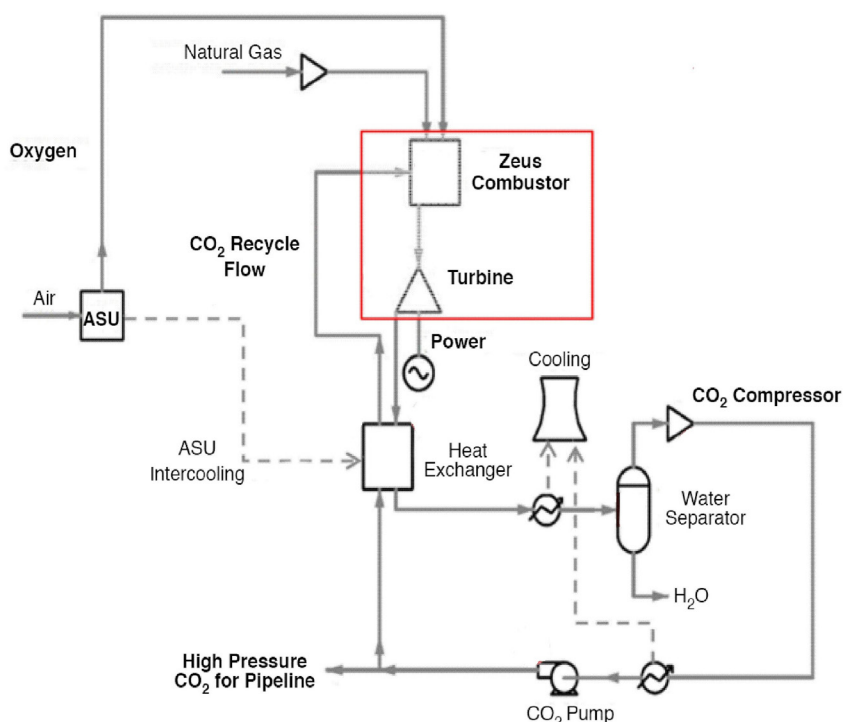


Рис. 1. Енергетична установка на основі циклу Аллама

Термодинамічний цикл Аллама, на відміну від традиційних комбінованих газотурбінних циклів, не використовує додатковий цикл Ренкіна, а покращує базовий газотурбінний цикл Брайтона. В основі цього циклу знаходиться спалювання природного або синтетичного газу (отриманого в процесі газифікації вугілля) в середовищі чистого кисню (т.зв. «кисневе спалювання»), на відміну від традиційного спалювання цих газів за допомогою атмосферного повітря.

Наслідком кисневого спалювання є те, що продукти згоряння являють собою відносно чисту суміш вуглекислого газу і водяної пари. Забруднюючі атмосферу речовини (оксиди азоту, сірки та ін.) або мінімальні, або взагалі відсутні.

З метою зменшення температури утворюваних в камері згоряння газів до цієї камери додається рециркуляційний потік вуглекислого газу, який відокремлюється у хвостових частинах установки з продуктів згоряння. Наслідком такого технічного рішення є те, що робоче тіло перед турбіною приблизно на 97 % складається з вуглекислого газу і на 3 % з водяної пари [1].

Тиск в камері згоряння планується реалізовувати в діапазоні від 20 до 40 МПа. Міра зниження тиску при подальшому розширенні в турбіні, відповідно, буде становити від 6 до 12.

При подальшому охолодженні в теплообміннику (рекуператорі) та кінцевому охолоджувачі водяна пара, яка міститься в робочому тілі, буде конденсуватися і як рідина відводиться від нього в сепараторі. Після цього маємо майже чистий потік вуглекислого газу.

Після підвищення тиску в компресорі цей вуглекислий газ поділяється на два потоки. Один з них спрямовується до споживача (або на зберігання) (це приблизно 4 % від його загальної кількості), інший (т.зв. рециркуляційний) – повертається до камери згоряння, охолоджує продукти згоряння і зменшує їх температуру до потрібного значення (це приблизно 96 % від загальної кількості CO_2).

Підігрів рециркуляційного вуглекислого газу в теплообміннику (рекуператорі) відбувається послідовно в двох секціях: низькотемпературній та високотемпературній. В низькотемпературній секції CO_2 підігрівається за рахунок тепла повітря, нагрітого в компресорі установки розділення. У високотемпературній секції CO_2 підігрівається за рахунок тепла відпрацьованого в турбіні робочого тіла.

Важливим фактором у досягненні високого ККД циклу є використання високої температури робочого тіла на вході в турбіну. Ця температура, однак, обмежена максимально допустимою температурою випускних газів з турбіни, які надходять безпосередньо в теплообмінник.

Оскільки робоча температура на гарячому кінці теплообмінника знаходиться в діапазоні від 700 до 750 °C, це призводить до типового обмеження температури робочого тіла на вході в турбіну діапазоном, відповідно, від 1100 до 1200 °C [1].

Новими і найбільш відповідальними частинами даної енергетичної установки є її турбіна та камера згоряння. Їх конструювання містить в собі поєднання досвіду газо- та паротурбінобудування.

Специфіка циклу Аллама у тому, що температура робочого тіла на вході до турбіни є невисокою для сучасних газових турбін, але дуже високою для парових турбін. Навпаки тиск у циклі відповідає сучасним зразкам парових турбін, але є надзвичайно високим для газових турбін. Наприклад, в дослідному зразку компанії NET Power камера згоряння була розроблена для роботи з тиском 30 МПа, що більш ніж у 10 разів перевищує тиск, який використовується в звичайних газотурбінних установках.

Турбіна для даної установки може бути сконструйована одноциліндровою, за будовою подібною до парових турбін високого тиску. Оскільки тиск на випуску з неї становить близько 3 МПа, немає потреби в додаткових циліндрах середнього та низького тисків.

Для турбіни доцільно використати структуру з подвійною оболонкою (зовнішній корпус і внутрішній корпус), що є конструктивною ознакою парових турбін високого тиску. Простір між внутрішнім і зовнішнім корпусами доцільно заповнювати потоком охолоджуючого вуглекислого газу, який відводиться для цього з нижньотемпературного кінця установки.

Така технологія охолодження дозволяє виготовляти зовнішній і більші внутрішні корпуси за допомогою лиття зі CrMoV-сплаву. Матеріал на основі нікелю використовується для меншого внутрішнього корпусу, який охоплює зону випуску, де температура перевищує 700°C і застосовується помірне охолодження.

На додаток до технології подвійного корпусу доцільним є використання охолоджуючого CO_2 для зменшення температури елементів проточної частини. Охолоджуючий потік вуглекислого газу подається на ротор і розподіляється на кожному ступені для захисту як соплових, так і робочих лопаток.

Дослідники відзначають, що через те, що температура робочого тіла не надто висока, потреби в організації пливкового охолодження лопаток немає. Просте конвекційне охолодження в даному випадку буде достатньо ефективним.

Процес згоряння в циклі Аллама має особливе значення, оскільки робочі речовини та тиск суттєво відрізняються від типових газотурбінних установок. Основними характеристиками камери згоряння для даного циклу є:

- майже нульові викиди NO_x через використання кисню, а не повітря;
- температура не така висока, як в існуючих камерах згоряння газотурбінних установок;
- тиск набагато вищий, ніж в існуючих камерах згоряння.

Чимала кількість останніх досліджень камер згоряння газотурбінних установок була пов'язана із зниженням викидів NO_x . Ці дослідження призвели до використання попереднього змішування, при якому паливо змішується з повітрям

перед згорянням, щоб забезпечити згоряння при нижчій температурі. Недоліком попереднього змішування є те, що воно викликає динамічні коливання системи через нестабільність полум'я.

Цикл Аллама має перевагу в цьому відношенні, оскільки він взагалі усуває NOx, одночасно дозволяючи використовувати в камері згоряння більш просте та стабільніше дифузійне горіння. Камера згоряння також може використовувати перевірену технологію охолодження, таку як зворотне конвекційне охолодження, завдяки помірній температурі згоряння та високій охолоджувальній здатності вуглекислого газу.

Очікується, що ефективність установки, виконаної за циклом Аллама, з урахуванням усіх втрат буде сягати 58 % при роботі на природному газі і 51 % при роботі на синтез-газі [1].

Література:

1. Isles J. Gearing up for a new supercritical CO2 power cycle system. Gas Turbine World. 2014. Vol. 44 (6). P. 14-18.
2. Allam R. NET Power's CO2 cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power Systems. URL: <http://surl.li/flcdax>.
3. Breaking ground for a groundbreaker: the first Allam Cycle power plant. Modern Power Systems. URL: <http://surl.li/cvfmcc>.
4. System and method for high efficiency power generation using a carbon dioxide circulating working fluid : US patent 8959887; published 2015-02-24; issued 2013-11-04; assigned to Palmer Labs, LLC and 8 Rivers Capital, LLC.
5. Dodge E. CCS Breakthrough: CO2 Power Cycles Offer Improved Efficiency and Integrated Carbon Capture. Breaking Energy. URL: <http://surl.li/wygibm>.
6. Allam R., Martin S., Forrest B., Fetvedt J., Lu X., Freed D., Brown G., Sasaki T., Itoh M., Manning J. Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture. Energy Procedia: 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14–18 November 2016. Vol. 114. P. 5948–5966.
7. Lu X., Forrest B., Martin S., Fetvedt J., McGroddy M., Freed D. Integration and Optimization of Coal Gasification Systems With a Near-Zero Emissions Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle. American Society of Mechanical Engineers: Digital Collection. Vol. 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO2 Power Cycles; Wind Energy. URL: <https://doi.org/10.1115/GT2016-58066>.

АНАЛІЗ ВИТРАТ НА ПІДГОТОВКУ КИСНЮ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ, ВИКОНАНОЇ ЗА ЦИКЛОМ АЛЛАМА

Патлайчук В. М.

канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри турбін
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна

Особливістю енергетичних установок, виконаних за циклом Аллама, є те, що в них спалювання природного або синтетичного газу відбувається нетрадиційним шляхом за допомогою атмосферного повітря, а в середовищі чистого кисню (т.зв. «кисневе спалювання»).

Наслідком кисневого спалювання є те, що продукти згоряння являють собою відносно чисту суміш вуглекислого газу і водяної пари. Забруднюючі атмосферу речовини (оксиди азоту, сірки та ін.) або мінімальні, або взагалі відсутні. Водяна пара при охолодженні продуктів згоряння в хвостових елементах установки конденсується і відокремлюється від них. Внаслідок цього на газовипуску маємо майже чистий потік вуглекислого газу, який може бути в подальшому спрямований або споживачу, або на зберігання. Викиди випускних газів від енергетичної установки до атмосфери взагалі відсутні.

Іншим наслідком кисневого спалювання, вже негативним, є необхідність попереднього приготування великої кількості чистого кисню. Конструктивно це реалізується в установках розділення повітря, наявність яких суттєво ускладнює енергетичну установку і збільшує собівартість генеруємої електроенергії.

Процес розділення повітря є дуже енерговитратним. Результати досліджень, наведені в роботах [1-4], свідчать про те, що на нього може відводитися від 9 до 12 % усієї електроенергії, генеруємої установкою. Більшими витратами в циклі на власні потреби є тільки витрати електричної енергії на стиснення вуглекислого газу.

Установки розділення повітря – це установки для розділення повітря на компоненти, а саме: кисень, азот, аргон, неон, ксенон, криптон. На практиці використовують три методи поділу: адсорбційний, мембранний та кріогенний. Звідси і типи установок: адсорбційні, мембранні та кріогенні. Для аналізу обираємо найбільш розповсюджену з них кріогенну установку.

В кріогенних установках повітря, що пройшло ряд фільтрів механічної фільтрації, потрапляє в компресор, де стискається до заданого тиску циклу. Далі повітря надходить у блок очищення та осушення, де за допомогою абсорбентів з нього видаляються волога, двоокис вуглецю та вуглеводні, після чого повітря потрапляє в теплообмінники. Після них воно йде в нижню колону ректифікації, де ректифікується на кубову рідину (~ 35 % O₂, 2 % Ar, решта – азот) і газоподібний азот з чистотою ~ 99,99 %.

Якщо установка отримує крім азоту ще й кисень, то кубова рідина подається в середину верхньої колони ректифікації, а рідкий азот у верхню частину верхньої колони ректифікації. З верху верхньої колони ректифікації відбирається газоподібний азот, внизу збирається рідкий кисень.