



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**

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 % O<sub>2</sub>, 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.

Витрата електроенергії на отримання 1 м<sup>3</sup> O<sub>2</sub> чистотою не менше 99,2 % залежить від багатьох факторів і для різних установок знаходиться в межах від 0,4 до 1,1 кВт·год. Для розрахунку обираємо значення цього параметра 0,6 кВт·год.

Приймаємо, що досліджувана енергетична установка, виконана за циклом Аллама, працює на природному газі з теплотворною здатністю 50032 кДж/кг. Оцінимо для неї необхідну продуктивність установки розділення повітря і витрати електроенергії на виробництво газоподібного кисню.

При розрахунках будемо приймати можливий діапазон зміни ефективності досліджуваної енергетичної установки від 48 до 64 % [4].

Для діапазону можливої корисної потужності енергетичної установки від 50 до 300 МВт результати розрахунку необхідної масової витрати кисню, а також потрібних витрат електричної енергії на отримання 99,2 % O<sub>2</sub> наведені на рис. 1 та 2.

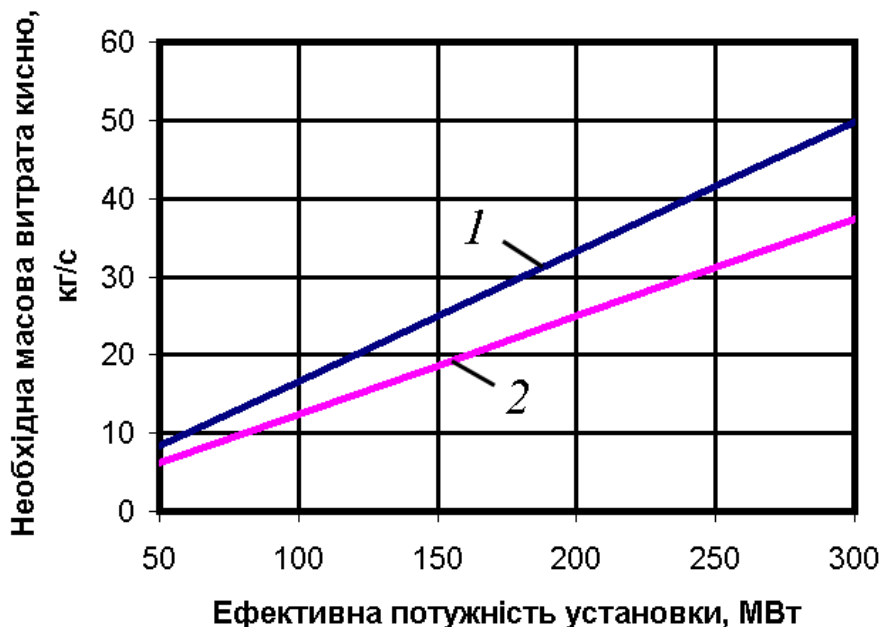


Рис. 1. Залежність витрати кисню від потужності енергетичної установки:

$$1 - \eta_e = 0,48; 2 - \eta_e = 0,64$$

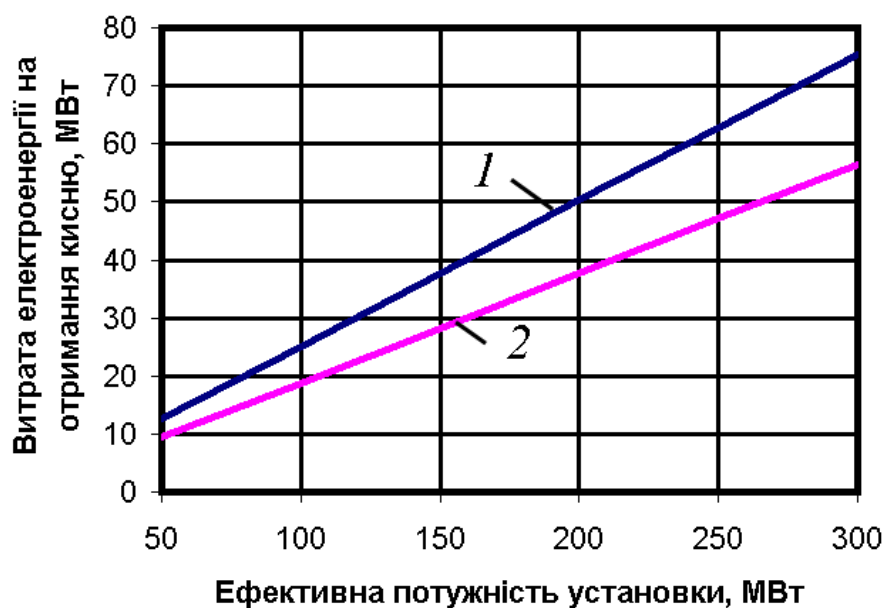


Рис. 2. Залежність витрат електроенергії на отримання кисню від потужності енергетичної установки:

$$1 - \eta_e = 0,48; 2 - \eta_e = 0,64$$

Результати розрахунків свідчать про те, що витрати на отримання кисню і його необхідна кількість при незмінному значенні ККД енергетичної установки залежать від її потужності прямопропорційно.

В діапазоні корисної потужності установки від 50 до 300 МВт потрібна для її функціонування витрата чистого кисню становить 6...50 кг/с (540...4310 т/добу). Відповідно витрата електроенергії на його приготування – від 9 до 75 МВт.

#### **Література:**

1. Isles J. Gearing up for a new supercritical CO<sub>2</sub> power cycle system. Gas Turbine World. 2014. Vol. 44 (6). P. 14-18.
2. Allam R. NET Power's CO<sub>2</sub> cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power Systems. URL: <http://surl.li/flcdax>.
3. Патлайчук В. М., Кутняк І. В. Аналіз параметрів енергетичної установки, виконаної за циклом Аллама. Суднова енергетика: стан і проблеми: Матеріали XI Міжн. наук.-техн. конференції. Миколаїв: НУК, 2023. С. 212-215.
4. Патлайчук В. М. Дослідження впливу максимального тиску в циклі Аллама на його ефективність. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XV Міжн. наук.-техн. конференції. Миколаїв: НУК, 2024. С. 120-122.

## **СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМИННО-РЕАКТИВНИХ ТУРБІН**

**Мелейчук О. С.**

аспірант

**Ванєєв С. М.**

канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технічної теплофізики  
Сумський державний університет  
м. Суми, Україна

**Корольов С. К.**

Фізична особа – підприємець

Стрімкий розвиток та впровадження новітніх методів та технологій дозволили прискорити розвиток та удосконалення вже існуючих конструкцій газотурбінних двигунів, турбомашин та установок на їх основі. Один із перспективних напрямків розвитку турбомашин та установок на їх основі - турбінне обладнання нетрадиційного виконання, а саме обладнання, виконане на основі вихрових та струминно-реактивних турбін (СРТ).

Даний тип устаткування знайшов застосування в створенні утилізаційних турбогенераторів малої потужності (до 500 кВт) які використовують енергію стиснутих газів. Відомі конструкції турбоагрегатів на основі СРТ [1, с. 304-306; 2, с. 66-71] мають просту конструкцію та здатні забезпечити електроенергією промислових або комунальних споживачів.

Нові конструкції турбоустановок потребують глибокого розуміння фізичних процесів, що протікають всередині проточної частини турбомашин, для підтвердження теоретичних моделей та вдосконалення існуючих конструкцій. Досліджувати ці процеси в турбоустановках можна як класичними методами, такими як проведення експериментальних або модельних випробувань, так і сучасними способами — моделюванням за допомогою програмно-обчислювальних комплексів. В обох випадках результати повинні підтверджувати правильність і достовірність теоретичних моделей.

Існує позитивний досвід як створення та використання експериментальних стендів для дослідження розширювальних турбомашин [3, с. 15-21], [4, с. 11-18], так і застосування програмно-обчислювального комплексу ANSYS для дослідження та проектування турбомашин [5, 6].

Проте сучасні програмні комплекси поступаються експериментальним чи модельним випробуванням через об'єктивність отриманих даних, складність налаштування, залежність від теоретичних моделей із потенційними похибками та високу вартість ліцензії, яка в деяких випадках досягає вартості виготовлення експериментального стенду.

Ці фактори спонукають до створення експериментального стенду для перевірки та підтвердження як теоретичних результатів, так і результатів, отриманих в результаті моделювання.

Завданням роботи полягає у створенні стенду для проведення випробування СРТ з метою отримання достовірних характеристик, визначення коефіцієнтів для уточнення методики розрахунку та верифікації майбутніх чисельних досліджень.

Стенд було створено на базі ТОВ «Укрнафтозапчастина». Він дозволяє проводити випробування різних конструкцій СРТ, які в подальшому можуть бути використані для створення турбогенераторів потужністю до 500 кВт.

Основними складовими стенду є: джерело стиснутого повітря (ресивер); трубопровідна обв'язка стенду; запірна та регулювальна арматура; підвідний патрубок; розширювальна турбомашина; інформаційно-вимірювальна система, для вимірювання основних показників СРТ.

Принципова схема та фото стенду представлені на рис. 1 та 2 відповідно.