

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.2\(495\).5](https://doi.org/10.15589/znп2024.2(495).5)

POSSIBILITIES OF USING AMMONIA IN HYBRID ENERGY SYSTEMS WITH SOLID OXIDE FUEL CELLS

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АМІАКУ В ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ТВЕРДООКСИДНИМИ ПАЛИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Serhiy I. Serbin

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Oleksandr A. Burunsuz

burik2012.s@gmail.com

ORCID: 0009-0007-5996-1657

С. І. Сербін,

д-р техн. наук, професор

О. А. Бурунсуз,

студент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The article is devoted to the development of a decarbonized energy system that operates on ammonia and consists of solid oxide fuel cells and a gas turbine. *The aim* of the work is theoretical research on the efficiency of the hybrid system for the production of electric and thermal energy, which operates on ammonia and consists of solid oxide fuel cells and a gas turbine. *Method.* To increase the efficiency of the hybrid system with solid oxide fuel cells and a gas turbine operating on ammonia, it is proposed to complicate the thermal scheme of the system by injecting steam into the gas turbine combustion chamber. Due to the supply of superheated steam to the combustion chamber, an improvement in the effective performance of the installation was obtained. Thermo-gas-dynamic calculations of the thermal scheme were carried out, rational parameters of the gas turbine unit, which is used for utilization of waste gases of fuel cells, were selected. *Scientific novelty.* For the first time, a scheme of a promising power plant operating on ammonia and using stacks of solid oxide fuel cells, as well as a contact gas turbine unit with over-expansion, is proposed. The rational parameters of the gas turbine part of the hybrid power system were obtained, namely the rates of pressure increase in the compressor and the exhauster, which allow increasing its specific power. The obtained results determined directions for improvement of promising energy systems with fuel cells and gas turbines operating on ammonia, expanded the understanding of the processes that cause energy conversion processes in such systems. *Practical significance.* The feasibility of using a gas turbine cycle with the injection of steam into the combustion chamber for the utilization of heat from waste gases of fuel cells operating on ammonia, as well as increasing the efficiency of the power system, has been proven. It is shown that the use of a contact gas turbine unit with an overexpansion turbine makes it possible to achieve the overall efficiency of the complex of 60.62% at the operating temperature of the fuel cells of 1190 K and their efficiency of 43.46%. This will make it possible to create highly efficient decarbonized energy systems for marine and stationary purposes.

Key words: hybrid energy system; ammonia; solid oxide fuel cell; gas turbine; power plant.

Анотація. Стаття присвячена розробці декарбонізованої енергетичної системи, що працює на аміаку та складається з твердооксидних паливних елементів та газової турбіни. *Метою роботи* є теоретичні дослідження ефективності гібридної системи для виробництва електричної та теплової енергії, що працює на аміаку і складається з твердооксидних паливних елементів і газової турбіни. *Методика.* Для підвищення ККД гібридної системи з твердооксидними паливними елементами і газовою турбіною, що працює на аміаку, запропоновано ускладнення теплової схеми системи впорскуванням водяної пари в камеру згоряння газотурбінного двигуна. За рахунок подачі перегрітої пари в камеру згоряння отримано покращення ефективних показників установки. Проведено термогазодинамічні розрахунки теплової схеми, вибрано раціональні параметри газотурбінного блоку, який використовується для утилізації відхідних газів паливних елементів та збільшення ефективного ККД установки, працюючої на аміаку. *Наукова новизна.* Вперше запропоновано схему перспективної електростанції, що працює на аміаку та використовує стеки твердооксидних паливних елементів, а також контактний газотурбінний агрегат з перерозширенням. Отримано раціональні параметри газотурбінної частини гібридної енергетичної системи, а саме міри підвищення тиску в компресорі та ексгаустері, які дозволяють збільшити

його питому потужність. Отримані результати визначили напрямки покращення перспективних енергетичних систем з паливними елементами та газовими турбінами, що працюють на аміаку, розширили уявлення про процеси, які обумовлюють процеси перетворення енергії в подібних системах. *Практична значимість.* Доведено перспективність використання газотурбінного циклу з впорскуванням водяної пари в камеру згоряння для утилізації теплоти відхідних газів паливних елементів, які працюють на аміаку, а також підвищення ефективності енергосистеми. Показано, що використання контактного газотурбінного агрегату з турбіною перерозширення дозволяє досягти загальної ефективності комплексу 60,62 % при робочій температурі паливних елементів 1190 К та їх ККД 43,76 %. Це дасть змогу створити високоефективні декарбонізовані енергетичні системи суднового та стаціонарного призначення.

Ключові слова: гібридна енергетична система; аміак; твердооксидний паливний елемент; газова турбіна; електростанція.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Твердооксидні паливні елементи (ТОПЕ), за міжнародною термінологією Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), мають досить широкий діапазон застосувань: від портативних джерел струму (10–800 Вт) до автономних стаціонарних електростанцій (1–15 МВт і більше). Їх привабливість зумовлена, перш за все, високою ефективністю прямого перетворення хімічної енергії палива в електричну. Має місце зростаючий інтерес до використання паливних елементів в складі енергетичних систем, які додатково використовують потенціал газових турбін (ГТ). Це так звані гібридні системи ТОПЕ-ГТ (SOFC-GT), в яких газотурбінна частина використовується для утилізації теплоти відхідних газів з анодної та катодної частин паливних елементів, при цьому зазвичай між паливним елементом і газовою турбіною встановлюють камеру допалювання (камеру згоряння), в якій в потоці окиснювача реагують залишки палива, що покидають паливні комірки (коефіцієнт використання палива в елементах 0,8–0,85). В якості палива найбільш часто використовують водень, однак потенційно паливом можуть служити будь-які вуглеводні, а окиснювачем – кисень чи повітря. В останні часи все більше дослідників розглядають аміак NH_3 (як газоподібний, так і рідкий) в якості перспективного палива для різних енергетичних систем, в тому числі і суднових.

З огляду на зростаючий попит на енергію з низьким вмістом вуглецю, аміак є вигідною альтернативою стандартним вуглеводням. Аміак може забезпечити економічний та технологічний шлях до чистого зберігання та використання енергії на глобальному рівні протягом наступних десятиліть [1, 2]. Аміак може бути використаний як ефективний носій перед генерацією електроенергії та згорянням, наприклад, в енергетичних системах з паливними елементами і газотурбінним агрегатом (ГТА) [3]. Цей підхід є перспективним, проведено ряд досліджень в цьому напрямку, включаючи і промислові випробування [4].

В даний час у зв'язку з розв'язанням задач декарбонізації енергетичних систем актуальним є питання аналізу можливостей використання аміаку в якості палива для гібридних систем ТОПЕ-ГТ. Причому це

завдання є важливим як для стаціонарних, так і транспортних енергетичних систем.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аміак варто розглядати як перспективне паливо через його потенціал для забезпечення життєздатної заміни вуглеводнів як основного енергетичного вектора економіки.

Аміак можна розглядати як перспективне паливо, оскільки він має потенціал замінити вуглеводні як основний енергетичний ресурс економіки. В роботі [5] доведено, що аміак є можливим паливом для твердооксидних паливних елементів, досліджено продуктивність трубчастого ТОПЕ, що працює на аміаку. Окиснення аміаку в ТОПЕ є двостадійним процесом: розкладання аміаку на вході на азот і водень з подальшим окисненням водню до води. Ефективність стеку паливного елемента перевірена за різних умов, показано високий потенціал аміаку як палива для подібних систем.

В роботі [6] розглянуто енергетичні системи з паливними елементами з прямим живленням аміаком і доведено, що вони є перспективним джерелом енергії для технологій паливних елементів наступного покоління. Однак їх розробка не знаходиться в теперішній час на етапі комерціалізації, бо потребує подальших досліджень і достатню кількість проблем ще належить вирішити.

В роботі [7] робиться висновок, що аміак можна використовувати як універсальне морське паливо навіть в умовах існуючої інфраструктури, оскільки це приводить до нульових викидів оксидів сірки та діоксиду вуглецю. Однак є кілька проблем, які необхідно подолати, щоб аміак використовувався для цілей декарбонізації судноплавства. Такі фактори містять в собі вибір відповідного генератора електроенергії, що працює на аміаку, вибір відповідного інструменту оцінки безпеки системи та заходів для усунення небезпечних факторів.

У статті [8] проведено техніко-економічний аналіз для інтеграції твердооксидних паливних елементів, що живляться аміаком, як енергетичної установки на борту комерційного судна. Враховуючи збільшення ваги енергетичної системи в машинному відділенні

встановлення запропонованої системи на борту судна потребує зменшення вантажу приблизно на 2,88 %.

У дослідженні [9] запропоновано конструкцію системи твердооксидних паливних елементів, що працюють на аміаку, і розроблено термодинамічну модель для оцінки її ефективності. Експериментальні результати порівняно з розрахунками за розробленою моделлю. Досягнуто електричну ефективність системи 52,1 % при роботі на аміаку.

Аналіз електрохімічного імпедансу, кількісна оцінка конверсії аміаку та двовимірне моделювання [10] показали, що зниження конверсії аміаку за низьких температур є основною причиною зниження ефективності ТОПЕ. Використання більш активного каталізатора розкладання аміаку може значно покращити характеристики систем з прямим живленням аміаком.

У дослідженні [11] запропоновано інтегровану конструкцію системи подачі палива NH_3 для океанського судна. Цільовим судном обрано великий контейнеровоз місткістю 14 000 TEU. Система подачі палива NH_3 з повторним зрідженням була розроблена для подачі рідкого палива при 40°C і тиску 80 бар.

Технологія ТОПЕ-ГТ привертає увагу через її багатообіцяюче рішення для чистого та ефективного виробництва електроенергії [12]. Загалом гібридні системи ТОПЕ-ГТ можуть використовувати різноманітні альтернативні види палива. В останні роки проведено багато досліджень з використання в них палива з біомаси, вугілля та аміаку. Аміак, як чисте паливо з високою енергетичною щільністю, має потенціал бути найкращим паливом для систем ТОПЕ-ГТ. Однак, щоб реалізувати широкі можливості аміаку в енергетичному секторі, необхідно вирішити проблеми щодо безпеки, вартості виробництва та допоміжних засобів. З постійним технологічним прогресом і скороченням витрат аміак може відігравати важливу роль у такому енергетичному переході.

Для підтвердження кількісних змін у термодинамічних характеристиках та економічних показниках відповідно до конфігурації системи ТОПЕ-ГТ проведено моделювання установки, що використовує аміачне паливо, і виконано енергетичний, ексергетичний та економічний аналізи [13]. З використанням аміаку ККД гібридної системи ТОПЕ-ГТ збільшився на 2–6 %, але вартість установки зросла на 14–24 %.

Для підвищення ККД гібридної системи ТОПЕ-ГТ використовують різні напрямки ускладнення теплових схем, одним з яких є цикл з впорскуванням водяної пари в камеру згоряння газотурбінного двигуна (інша назва – цикл з контактною газотурбінною установкою). За рахунок подачі перегрітої пари в камеру згоряння можливо отримати покращення ефективних показників подібних систем, що і використано в даній роботі.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз останніх досліджень і напрямків використання аміаку в якості палива для гібридних систем ТОПЕ-ГТ виявив невирішені питання, пов'язані з обґрунтуванням найбільш ефективних в термодинамічному плані систем газотурбінної утилізації теплоти відхідних газів паливних елементів, а також з оцінкою раціональних параметрів газотурбінного блоку, який використовує впорскування водяної пари в камеру згоряння з метою покращення питомої потужності всієї енергетичної системи.

Метою роботи є теоретичні дослідження ефективності гібридної системи для виробництва електричної та теплової енергії, що працює на аміаку і складається з твердооксидних паливних елементів і газової турбіни.

В якості **об'єкта дослідження** вибрано термодинамічні процеси в гібридній системі для виробництва електричної та теплової енергії. **Предмет дослідження** – закономірності процесів перетворення енергії в гібридній системі ТОПЕ-ГТ при використанні газотурбінного агрегату контактного типу та роботи на аміаку.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Автори пропонують схему гібридної енергетичної установки, яка працює на аміаку та використовує твердооксидні паливні елементи з контактним газотурбінним агрегатом (КГТА) з перерозширенням (рис. 1). На відміну від раніше розглянутих схем з регенеративною газовою турбіною [14] та контактним газотурбінним агрегатом [15], що працюють на природньому газі, в схему додано ряд нових елементів, які забезпечують подачу, випаровування та риформінг аміаку при роботі паливних елементів і газотурбінної частини системи. Така схема дозволяє знизити тиск в корпусах стеків твердооксидних паливних елементів та підвищити питому потужність енергетичної установки.

Атмосферне повітря компресується за допомогою компресора 2 до певного рівня тиску і проходить через повітропідігрівач першого ступеня 6. У цьому повітропідігрівачі воно попередньо нагрівається газами, що виходять з турбіни 3, яка приводить у рух компресор 2, ексгаустер 4, а зайву енергію передає електрогенератору 1. Після цього циклове повітря проходить у повітропідігрівач другого ступеня 7, де воно нагрівається до заданої температури газами, що виходять з камери згоряння (КЗ) 12. Паливом для КЗ 12 є суміш газів з анодів стеків ТОПЕ, яка спалюється у збідненому киснем повітрі, що надходить у КЗ з катодів комірок ТОПЕ.

Охолоджені до певної температури продукти згоряння після повітропідігрівача другого ступеня 7 поступають до турбіни 3, де розширюються до тиску

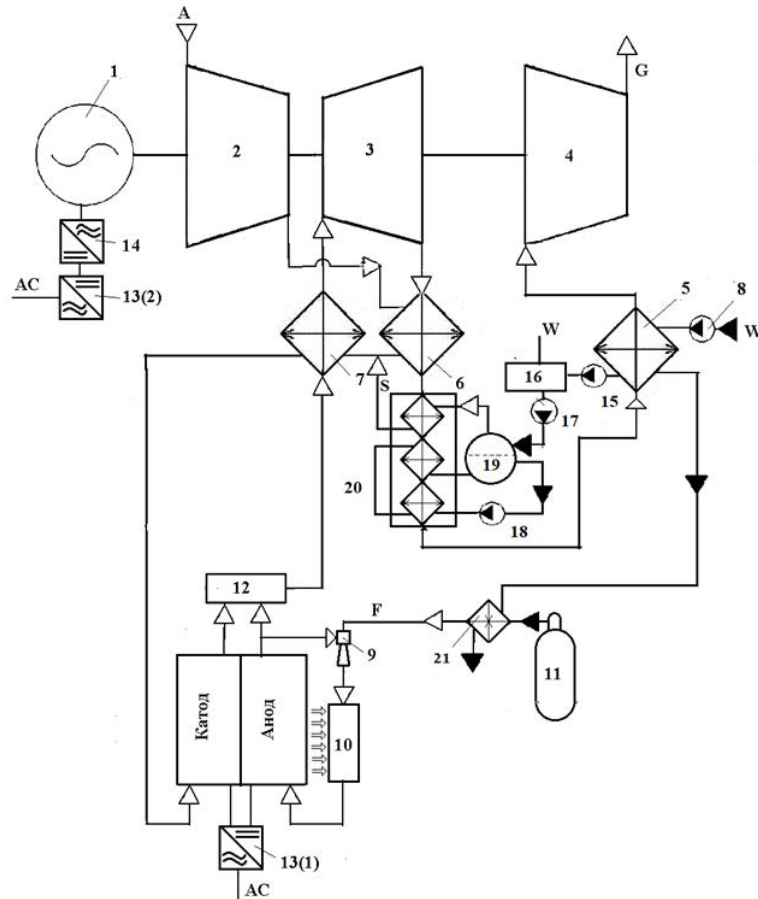


Рис. 1. Схема суднової електростанції, що працює на аміаку та використовує стеки ТОПЕ та КГТА: 1 – електродвигун; 2 – компресор; 3 – турбіна; 4 – ексгаустер; 5 – охолоджувач-конденсатор; 6 – повітропідігрівач першого ступеня (ПП1); 7 – повітропідігрівач другого ступеня (ПП2); 8 – насос охолоджувальної води; 9 – ежектор подачі аміаку; 10 – вбудований у стек підігрівач аміаку; 11 – балони з рідким аміаком; 12 – камера згоряння; 13(1), 13(2) – перетворювачі постійного струму на змінний; 14 – перетворювач змінного струму на постійний; 15 – конденсатний насос; 16 – цистерна живильної води; 17 – живильний насос утилізаційного парогенератора (УПГ); 18 – циркуляційний насос УПГ; 19 – сепаратор пари УПГ; 20 – УПГ; 21 – випарник аміаку; А – атмосферне повітря; G – відхідні газ; F – подача палива (газоподібний аміак); S – перегріта водяна пара; W – вода

нижчого за атмосферний, рівень якого визначається розрахунковим значенням міри підвищення тиску в ексгаустері 4. Після цього вихлопні газ з турбіни 3, пройшовши канали газової сторони повітропідігрівача першого ступеня 6, підводяться в УПГ 20. Тут вони використовуються для генерації перегрітої водяної пари, яка потім подається в КЗ 12.

Після проходження через УПГ газопарова суміш подається у охолоджувач-конденсатор 5, де відбувається її охолодження водою до визначеної температури. Під час цього процесу частина водяної пари з газопарової суміші конденсується і направляється насосом 15 до резервуару живильної води 16, яка потім за допомогою насоса 17 подається в сепаратор 19 УПГ. Охолоджені та зневоднені продукти згоряння стискаються в ексгаустері 4 і викидаються в атмосферу.

Зріджений аміак, що зберігається в криогенних ємностях 11 при температурі 20 °С і тиску 8,8 бар надходить у випарник 21, прокачуваний підігрітою

охолоджувальною водою після охолоджувача-конденсатора 5, де випаровується і вже в газоподібному вигляді, подається в ежектор. Після ежектора 9 аміак проходить вбудований підігрівач 10, а потім надходить на аноди стека ТОПЕ.

Параметри стеку твердоокисних паливних елементів фірми Siemens-Westinghouse, які використано при розрахунках гібридної електростанції, взято з роботи [16] і модифіковано для роботи на аміаку: робоча температура паливних елементів 1190 К, ККД 43,76 %. Для проведення термогазодинамічних розрахунків запропонованої теплової схеми використано математичну модель, яка детально описана в [15] з додатковим урахуванням теплофізичних властивостей аміаку.

Виконано параметричний аналіз теплової схеми гібридної електростанції на аміаку потужністю 2500 кВт, що використовує стеки твердоокисних паливних елементів у комплексі з контактним газотурбінним агрегатом.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 2 представлено залежності впливу міри підвищення тиску газу в ексгаустері ГТА на ефективний ККД електростанції ТОПЕ-ГТ, яка працює на аміаку, в діапазоні значень міри підвищення тиску повітря в компресорі $\pi_c = 5-10$, подібними до випадку роботи електростанції на метані [15].

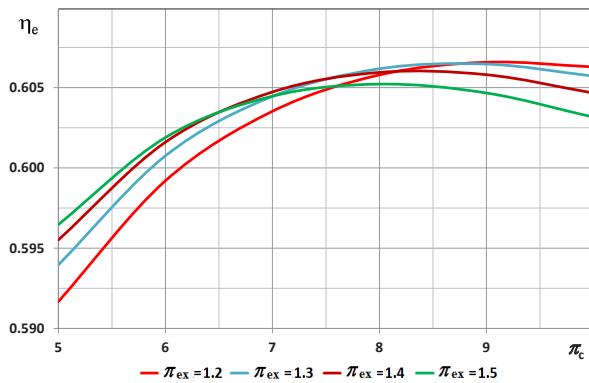


Рис. 2. Залежності ефективного ККД електростанції ТОПЕ-ГТ при роботі на аміаку для значень $\pi_{ex} = 1,2-1,5$

Графіки рис. 2 показують, що вплив на ефективний ККД електростанції міри підвищення тиску в ексгаустері ГТА π_{ex} дуже помітний при малих значеннях міри підвищення тиску повітря в компресорі $\pi_c \leq 7$.

Враховуючи на те, що зі зростанням параметра π_c темп збільшення ефективного ККД схеми ТОПЕ-ГТ суттєво уповільнюється, а також значно зменшується вплив міри підвищення тиску в ексгаустері ГТА π_{ex} , проєктне значення цього параметра може прийматися на рівні $\pi_{ex} = 1,3-1,4$ для $\pi_c = 7-8$.

Рис. 3 демонструє зміну потужності газотурбінної частини теплової схеми в зазначеному діапазоні π_c , що отримана при тих же умовах, що і залежності на рис. 2.

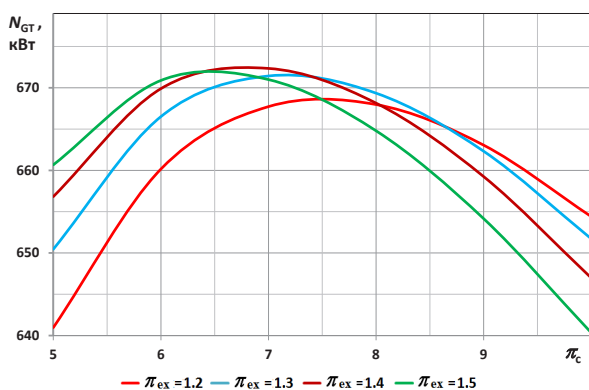


Рис. 3. Зміна потужності газотурбінної частини схеми ТОПЕ-ГТ для значень π_{ex} від 1,2 до 1,5

Як видно з результатів, представлених на рис. 3, вплив міри підвищення тиску в ексгаустері ГТА на потужність газотурбінної частини гібридної схеми ТОПЕ-ГТ дуже суттєвий, особливо при невисоких

значеннях міри підвищення тиску в компресорі ГТД. Можна рекомендувати той самий проєктний інтервал π_{ex} на рівні 1,3-1,4 при $\pi_c = 7-8$.

Потужність газотурбінної частини електростанції може змінюватися в залежності від величини розрахункової міри підвищення тиску в компресорі ГТД в інтервалі від 640 до 673 кВт, дещо збільшуючись зі зростанням розрахункової міри підвищення тиску суміші ексгаустері π_{ex} , але за простежується лише до значень $\pi_c \leq 7$.

На рис. 4 показано графіки зміни температури газопарової суміші перед турбіною для гібридної схеми ТОПЕ-ГТ, а на рис. 5 – графіки зміни температури газопарової суміші на виході з камери згоряння для ряду значень міри підвищення тиску в ексгаустері в діапазоні значень π_{ex} від 1,2 до 1,5.

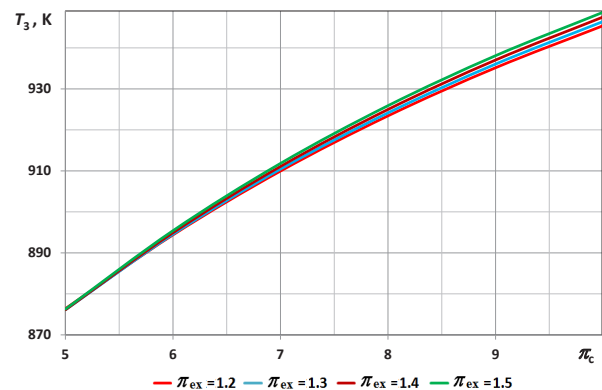


Рис. 4. Зміна температури газопарової суміші перед турбіною для гібридної схеми ТОПЕ-ГТ

Розрахунки показують, що температура газу перед турбіною ГТД в проаналізованому діапазоні параметрів, зростає в інтервалі 876-948 К зі збільшенням міри підвищення тиску в компресорі ГТД від $\pi_c = 5$ до 10, що пояснюється відповідним збільшенням температури повітря на вході в повітропідігрівач другого ступеня.

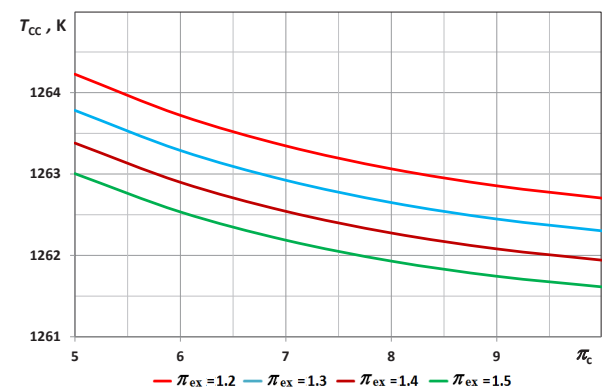


Рис. 5. Зміна температури газопарової суміші на виході з камери згоряння для гібридної схеми ТОПЕ-ГТ

Графіки рис. 5 характеризують роботу камери згоряння, в якій реагують залишкові горючі продукти риформінгу аміаку, що виходять з анодів комірок ТОПЕ, із сумішшю збідненого за киснем повітря з водяною парою, яка виходить з катода стеків ТОПЕ. Слід зазначити деяке зниження температури на виході камери згоряння при зростанні міри підвищення тиску в компресорі ГТД від $\pi_c = 5$ до 10. Збільшення міри підвищення тиску суміші в ексгаустері в розглянутому діапазоні значень π_{ex} від 1,2 до 1,5 також дещо знижує цю температуру. Зазначимо, що виявлена закономірність пояснюється характером збільшення витрати повітря, що подається компресором ГТД в катода стеків ТОПЕ із зростанням міри підвищення тиску в компресорі, що показано на рис. 6.

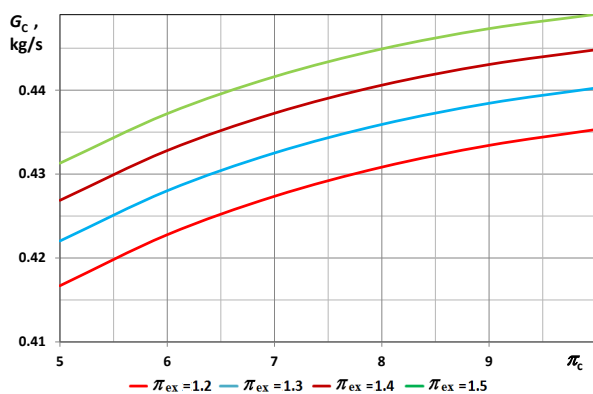


Рис. 6. Зміна витрати повітря через компресор ГТД, що припадає на один стек ТОПЕ, в гібридній схемі ТОПЕ-ГТ

Аналіз графіків на рис. 6 показує, що зі зростанням розрахункової міри підвищення тиску в компресорі ГТД π_c від 5 до 10 збільшується і величина масової витрати повітря через компресор ГТД, що припадає на один стек ТОПЕ. Також зі збільшенням міри підвищення тиску суміші в ексгаустері в розглянутому діапазоні значень π_{ex} від 1,2 до 1,5 витрата повітря зростає в середньому приблизно на 1,1 % на кожне підвищення на 0,1 значення параметра π_{ex} .

На рис. 7 показано залежності зміни відносного паровмісту в потоці газопарової суміші перед турбіною ГТД в залежності від розрахункової міри підвищення тиску в компресорі ГТД π_c при зміні міри підвищення тиску суміші в ексгаустері π_{ex} в діапазоні від 1,2 до 1,5.

Аналіз залежностей на рис. 7 показує дуже високий відсоток пари в газопаровій суміші перед турбіною ГТД, який може становити від 6,2 до 10 %. При цьому паровміст у суміші зростає при зменшенні як розрахункової міри підвищення тиску в компресорі ГТД π_c ,

так і міри підвищення тиску суміші в ексгаустері π_{ex} . На номінальному режимі енергетичної системи величина паровмісту становить близько 7,64 %.

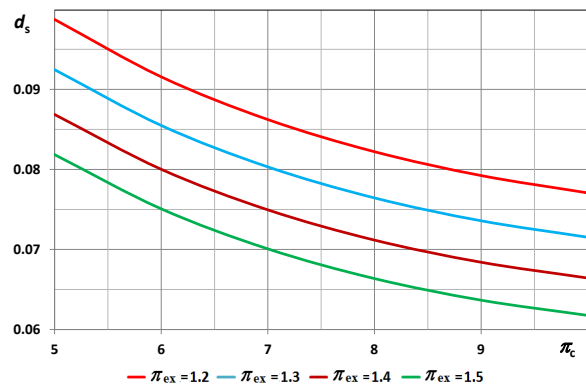


Рис. 7. Зміна відносного паровмісту в потоці газопарової суміші перед турбіною ГТД при зміні розрахункової міри підвищення тиску в ексгаустері від 1,2 до 1,5

На рис. 8 представлено залежності зміни витрати повітря через компресор ГТД, що подає повітря через всі 15 стеків ТОПЕ електростанції потужністю 2500 кВт за схемою ТОПЕ-ГТ, в інтервалі розглянутої зміни визначальних параметрів.

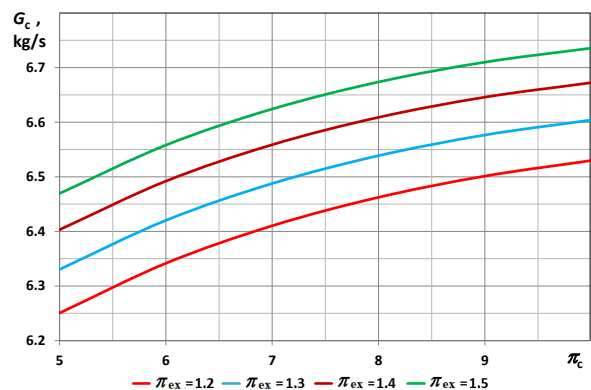


Рис. 8. Зміна витрати повітря через компресор ГТД електростанції потужністю 2500 кВт

Як видно із графіків на рис. 8, витрати повітря через компресор ГТД можуть змінюватися залежно від розрахункової міри підвищення тиску π_c від 6,25 до 6,74 кг/с, зростаючи зі збільшенням цього параметра. Слід зазначити зростання масової витрати повітря також зі збільшенням міри підвищення тиску суміші в ексгаустері ГТА.

В табл. 1 наведено розрахункові проєктні параметри гібридної схеми ТОПЕ-ГТ з контактним ГТА, що працює на аміаку, для електростанції потужністю 2500 кВт.

Таблиця 1. Параметри теплової схеми електростанції на аміаку потужністю 2500 кВт за схемою ТОПЕ-ГТ

Параметр	Значення
1. Число стеків ТОПЕ фірми Siemens-Westinghouse	15
2. Температура зовнішнього повітря, К	288
3. Витрата повітря через компресор ГТД, кг/с	6,5385
4. Міра підвищення тиску в компресорі ГТД	8,0
5. Температура повітря на входе в ПП1, К	575
6. Внутрішній ККД компресора, %	80
7. Температура повітря на виході з ПП1, К	651
8. Температура суміші повітря та пари на виході з ПП2, К	1025
9. Температура суміші повітря та пари на виході зі стеку, К	1190
10. Тиск газоподібних компонентів на виході зі стеку, МПа	0,7702
11. Витрата суміші повітря та пари на виході зі стеків, кг/с	6,3825
12. Витрата аміаку на електростанцію, кг/год	826,2
13. Температура газу на виході з камери згоряння, К	1263
14. Температура газу на вході в турбіну, К	924
15. Витрата суміші на вході в турбіну, кг/с	6,887
16. Міра зниження тиску в турбіні ГТД	9,303
17. Внутрішній ККД турбіни, %	90
18. Температура суміші на виході з турбіни, К	559
19. Температура суміші на вході до УПГ, К	490
20. Температура суміші на виході з УПГ, К	448
21. Тиск пари в сепараторі УПГ, МПа	0,8023
22. Паропроодуктивність УПГ, кг/с	0,1190
23. Температура пароперегріву, К	457
24. Міра підвищення тиску в ексгаустері ГТД	1,3
25. Внутрішній ККД ексгаустера, %	85
26. Температура суміші на вході в ексгаустер, К	294
27. Температура газу на виході з ексгаустера, К	320
28. Вихід конденсату з охолоджувача-конденсатора, кг/год	1393
29. Потужність ГТД, кВт	669,3
30. Потужність стека ТОПЕ Siemens-Westinghouse, кВт	128,3
31. Потужність батареї стеків, кВт	1923,8
32. Загальна потужність електростанції, кВт	2593,1
33. Ефективний ККД електростанції, %	60,62

ВИСНОВКИ

1. Розроблено схему перспективної суднової електростанції ТОПЕ-ГТ, яка працює на аміаку та використовує стеки твердооксидних паливних елементів, а також контактний газотурбінний агрегат.

2. Доведено ефективність газотурбінної частини установки з впорскуванням водяної пари в камеру згоряння для утилізації теплоти відхідних газів паливних елементів гібридної енергетичної системи, яка використовує аміак як паливо.

3. Показано, що використання контактного газотурбінного агрегату дозволяє отримати

загальну ефективність гібридної системи 60,62 % при робочій температурі ТОПЕ 1190 К та ККД стеків 43,76 %.

4. Проектне значення міри підвищення тиску в ексгаустері установки доцільно приймати в діапазоні 1,3–1,4 з урахуванням міри підвищення тиску в компресорі газотурбінного двигуна 7–8.

5. Потрібні подальші дослідження в напрямку вибору раціональних параметрів елементів теплової схеми ТОПЕ-ГТ, в також розробки конструктивних схем допалювачів відхідних газів паливних елементів при їх роботі на аміаку.

REFERENCES

- [1] Lee, H., & Lee, M. (2021). Recent advances in ammonia combustion technology in thermal power generation system for carbon emission reduction. *Energies*, vol. 14, no. 18, 5604.
- [2] Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., & Joannon, M.D. (2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Front. Mech. Eng., Sec. Engine and Automotive Engineering*, vol. 8.
- [3] Ito, S., Uchida, M., Suda, T., & Fujimori, T. (2020). Development of ammonia gas turbine co-generation technology. *IHI Engineering Review*, vol. 53, no. 1, pp. 1–6.

- [4] Mitsubishi Power. (2022). Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system. Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025. Available: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>.
- [5] Fuerte, A., Valenzuela, R.X., Escudero, M.J., & Daza, L. (2009). Ammonia as efficient fuel for SOFC. *Journal of Power Sources*, vol. 192, pp. 170–174.
- [6] Afif, A., Radenahmad, N., Cheok, Q., Shams, S., Kim, J.H., & Azad, A.K. (2016). Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 822–835.
- [7] Cheliotis, M., Boulougouris, E., Trivyza, N.L., Theotokatos, G., Livanos, G., Mantalos, G., Stubos, A., Stamatakis, E., & Venetsanos, A. (2021). Review on the Safe Use of Ammonia Fuel Cells in the Maritime Industry. *Energies*, vol. 14, 3023.
- [8] Micco1, S.D., Minutillo, M., Mastropasqua, L., Cigolotti, V., & Brouwer, J. (2022). Ammonia-based Solid Oxide Fuel Cell for zero emission maritime power: a case study. *E3S Web of Conferences*, vol. 334, 06007.
- [9] Barelli, L., Bidini, G., & Cinti, G. (2022). Operation of a Solid Oxide Fuel Cell Based Power System with Ammonia as a Fuel: Experimental Test and System Design. *Energies*, vol. 13, 6173.
- [10] Oh, S., Oh, M.J., Hong, J., Yoon, K.J., Ji, H.I., Lee, J.H., Kang, H., Son, J.W., & Yang, S. (2022). A comprehensive investigation of direct ammonia-fueled thin-film solid-oxide fuel cells: Performance, limitation, and prospects. *iScience*, vol. 25, no. 9, 105009.
- [11] Lee, J., Choi, Y., & Choi, J. (2022). Techno-Economic Analysis of NH₃ Fuel Supply and Onboard Re-Liquefaction System for an NH₃-Fueled Ocean-Going Large Container Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, 1500.
- [12] Yuan, Q., Li, X., Han, S., Wang, S., Wang, M., Chen, R., Kudashev, S., Wei, T., & Chen, D. (2024). Performance Analysis and Optimization of SOFC/GT Hybrid Systems: A Review. *Energies*, vol. 17, 1265.
- [13] Kim, J.-S., & Kim, D.-Y. (2023). Energy, Exergy, and Economic (3E) Analysis of SOFC-GT-ORC Hybrid Systems for Ammonia-Fueled Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, 2126.
- [14] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., Dzida, M., & Chen, D. (2022). Application analysis of a hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine system for marine power plants. *Ships and Offshore Structures*, vol. 17(4), pp. 866–876.
- [15] Chen, D., Serbin, S., Washchilenko, N., & Burunsuz, K. (2024). Parameter evaluation for a hybrid marine system combining solid oxide fuel cells and overexpanded steam-injected gas turbine. *International Journal of Thermofluids*, vol. 21, 100565.
- [16] Bakalis, D. P. (2014). Turbomachinery Analysis and Design for Hybrid SOFC-GT Systems Optimized Performance. PhD thesis: University of Thessaly, 171 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Lee, H., Lee, M. (2021). Recent advances in ammonia combustion technology in thermal power generation system for carbon emission reduction. *Energies*, vol. 14, no. 18, 5604.
- [2] Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., Joannon, M.D. (2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Front. Mech. Eng., Sec. Engine and Automotive Engineering*, vol. 8.
- [3] Ito, S., Uchida, M., Suda, T., Fujimori, T. (2020). Development of ammonia gas turbine co-generation technology. *IHI Engineering Review*, vol. 53, no. 1, pp. 1–6.
- [4] Mitsubishi Power. (2022). Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system. Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025. Available: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>.
- [5] Fuerte, A., Valenzuela, R.X., Escudero, M.J., Daza, L. (2009). Ammonia as efficient fuel for SOFC. *Journal of Power Sources*, vol. 192, pp. 170–174.
- [6] Afif, A., Radenahmad, N., Cheok, Q., Shams, S., Kim, J.H., Azad, A.K. (2016). Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 822–835.
- [7] Cheliotis, M., Boulougouris, E., Trivyza, N.L., Theotokatos, G., Livanos, G., Mantalos, G., Stubos, A., Stamatakis, E., Venetsanos, A. (2021). Review on the Safe Use of Ammonia Fuel Cells in the Maritime Industry. *Energies*, vol. 14, 3023.
- [8] Micco1, S.D., Minutillo, M., Mastropasqua, L., Cigolotti, V., Brouwer, J. (2022). Ammonia-based Solid Oxide Fuel Cell for zero emission maritime power: a case study. *E3S Web of Conferences*, vol. 334, 06007.
- [9] Barelli, L., Bidini, G., Cinti, G. (2022). Operation of a Solid Oxide Fuel Cell Based Power System with Ammonia as a Fuel: Experimental Test and System Design. *Energies*, vol. 13, 6173.
- [10] Oh, S., Oh, M.J., Hong, J., Yoon, K.J., Ji, H.I., Lee, J.H., Kang, H., Son, J.W., Yang, S. (2022). A comprehensive investigation of direct ammonia-fueled thin-film solid-oxide fuel cells: Performance, limitation, and prospects. *iScience*, vol. 25, no. 9, 105009.
- [11] Lee, J., Choi, Y., Choi, J. (2022). Techno-Economic Analysis of NH₃ Fuel Supply and Onboard Re-Liquefaction System for an NH₃-Fueled Ocean-Going Large Container Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, 1500.
- [12] Yuan, Q., Li, X., Han, S., Wang, S., Wang, M., Chen, R., Kudashev, S., Wei, T., Chen, D. (2024). Performance Analysis and Optimization of SOFC/GT Hybrid Systems: A Review. *Energies*, vol. 17, 1265.
- [13] Kim, J.-S., Kim, D.-Y. (2023). Energy, Exergy, and Economic (3E) Analysis of SOFC-GT-ORC Hybrid Systems for Ammonia-Fueled Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, 2126.
- [14] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., Dzida, M., Chen, D. (2022). Application analysis of a hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine system for marine power plants. *Ships and Offshore Structures*, vol. 17(4), pp. 866–876.
- [15] Chen, D., Serbin, S., Washchilenko, N., Burunsuz, K. (2024). Parameter evaluation for a hybrid marine system combining solid oxide fuel cells and overexpanded steam-injected gas turbine. *International Journal of Thermofluids*, vol. 21, 100565.
- [16] Bakalis, D. P. (2014). Turbomachinery Analysis and Design for Hybrid SOFC-GT Systems Optimized Performance. PhD thesis: University of Thessaly, 171 p.

© Сербін С. І., Бурунсуз О. А.

Дата надходження статті до редакції: 11.04.2024

Дата затвердження статті до друку: 23.04.2024