

УДК 629.5.03:621.452.3.02:004.942

doi: 10.32620/akt.2022.4sup.1.11

О. К. ЧЕРЕДНІЧЕНКО, М. Р. ТКАЧ, О. С. МИТРОФАНОВ, Д. В. КОСТЕНКО

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБІННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ З ТЕРМОХІМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ ПАЛИВА

В роботі обговорено методологічні аспекти дослідження методами математичного моделювання процесів в суднових енергетичних установках з термохімічною обробкою палива. Розглянуто результати дослідження фізико-хімічних процесів в структурно-функціональних блоках, що моделюють одиничні ланки термодинамічного циклу. Поєднання блоків зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків надає можливість моделювання повної схеми математичної моделі енергомодулю. У зв'язку з різноманітністю та складністю процесів в комбінованому дизель-газотурбінному енергетичному комплексі з термохімічною системою обробки палива при моделюванні характеристики енергетичного обладнання визначались окремо з подальшим зрощуванням отриманих результатів та поєднанням моделей зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків. Математичні моделі газотурбінного двигуна, контуру утилізації, блоку термохімічної обробки палива створено за допомогою системи моделювання фізико-хімічних процесів Aspen Plus. Робочі процеси в ДВЗ моделювалися за допомогою програмного комплексу СЕМКІН. Доведено, що універсальні математичні моделі теплових двигунів, які входять до складу енергомодуля з термохімічною обробкою палива, потребують налаштування на обрані базові характеристики. Тому математичні моделі структурно-функціональних блоків і груп блоків (ГТД та ін.) містять алгоритми налаштування моделей при їх верифікації за цільовими функціями. Запропоновані алгоритми забезпечують верифікацію розроблених математичних моделей за показниками існуючих або перспективних газотурбінних двигунів та ДВЗ. Вказані алгоритми надають можливість коректного налаштування параметрів устаткування дизель-газотурбінних енергетичних комплексів з термохімічною обробкою палива. Математична модель робочого циклу ДВЗ на базі програмного комплексу СЕМКІН забезпечує можливість проводити первинну оцінку ефективності енергоперетворення у робочому циліндрі. Результати оцінки адекватності математичної моделі робочого циклу ДВЗ на базі програмного комплексу СЕМКІН показали задовільне узгодження отриманих результатів з експериментальними даними. Максимальна середньоквадратична похибка розрахункових даних, отриманих на основі моделі, знаходиться у межах 8,5 %.

Ключові слова: суднові енергетичні установки; системи термохімічної обробки палива; газотурбінний двигун; математичне моделювання.

Вступ

Світові тенденції підвищення енергетичної ефективності використання паливних ресурсів з одночасною мінімізацією викидів в навколишнє середовище CO₂, NO_x та інших шкідливих речовин потребують адаптації в суднову енергетику перспективних енергозберігаючих технологій.

Відома технологія термохімічної обробки палив шляхом регенерації вторинних енергоресурсів теплових двигунів, являє собою сукупність процесів, в результаті яких приріст ентальпії енергоносія (суміші вуглеводневого палива та окиснювача) є наслідком зміни його хімічного складу за рахунок ендотермічного процесу конверсії базового палива з використанням вторинних енергоресурсів теплового двигуна [1].

В якості базового енергоносія можуть використовуватися такі альтернативні палива як ета-

нол/біоетанол, метанол, природний газ, нафтовий попутний газ різного складу, газоподібне паливо на основі важких вуглеводнів (етан, пропан, бутан та інші) [2, 3].

Перспективне застосування термохімічної утилізації в контактних газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних електрогенеруючих установках [4]. В таких установках передбачається термохімічна утилізація теплоти відхідних газів ГТД шляхом парової конверсії вуглеводневого палива. Продукти конверсії використовуються в якості палива.

Енергетична установка яка є складовою багаторівневої технічної системи - судна досліджена методами математичного моделювання, при цьому багатоваріантність схемних рішень потребує виявлення взаємозв'язків елементів методами системного аналізу.

Функціональна декомпозиція дозволяє уявити енергетичний модуль з термохімічними системами

утилізації (ТХСУ) вторинних енергоресурсів у вигляді сукупності підсистем. У свою чергу, кожна підсистема формується як сукупність блоків (нагінтачі, реактори та ін.) та груп блоків, об'єднаних певною функціональною ознакою (газотурбінний двигун, ДВЗ та ін.) [5].

Математичні моделі блоків та груп блоків, які утворюють математичну модель підсистеми, являють, зазвичай, систему нелінійних алгебраїчних рівнянь.

В умовах дослідження перспектив втілення нових технологій при математичному моделюванні доцільно використовувати модульний підхід (Sequential Modular, SM) [6]. Рівняння для кожного блоку (наприклад, термохімічного реактору) розв'язуються за допомогою індивідуальних алгоритмів. В такому разі для всіх розрахункових модулів дотримується заздалегідь задана логічна послідовність обчислення. Переваги такого підходу до пошуку раціональних рішень є:

- можливість випробування алгоритмів обчислення з подальшою верифікацією отриманих результатів окремо для деяких блоків або груп блоків;

- модульна структура дозволяє легко додавати нові блоки та модернізувати існуючі;

- відносна простота та прозорість рішень надає можливість легкої перевірки вихідних даних на відповідність та повноту.

Прикладом реалізації такого підходу є програмне забезпечення для моделювання фізико-хімічних процесів, яке реалізоване у програмному комплексі Aspen Plus [7]. Система базується на структурно-функціональних блоках, що моделюють одиничні ланки термодинамічного циклу або технологічного процесу. Основні блоки наступні: регулятори потоку, теплообмінники, пристрої зміни тиску, реактори (табл. 1).

Поєднання блоків зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків надає можливість моделювання повної схеми процесу.

1. Стан проблеми

Енергетичний модуль з термохімічними системами утилізації вторинних енергоресурсів може бути представлений у вигляді сукупності підсистем:

- енергетичної підсистеми, в якій хімічна енергія палива перетворюється в механічну, електричну та теплову енергію;

- підсистеми термохімічної утилізації та перетворення енергії.

Підсистема термохімічної утилізації та перетворення енергії складається з двох частин:

- контуру утилізації теплоти, що призначений для підводу теплоти вторинних енергоресурсів дви-

гуна до споживачів контуру термохімічного перетворення енергії;

- контур термохімічного перетворення енергії, який може бути виконано в формі блоку термохімічної обробки палива.

Таблиця 1
Структурно-функціональні блоки [7]

Загальна назва	Варіанти виконання	Призначення
Регулятори потоку	Змішувачі	Моделювання процесів змішування та розподілу потоків в клапанах та ін.
	Розподільники	
Теплообмінники	Нагрівачі	Моделювання процесів передачі теплоти, гідродинамічних процесів в теплообмінниках різного конструктивного виконання, визначення теплового і фазового стану вихідного потоку
	Охолодники	
Пристрої зміни тиску	Насос/гідралічний мотор	Моделювання процесів зміни тиску відповідно до заданої потужності, тиску на виході, кривих продуктивності та ін.
	Компресор/турбіна	
	Клапан	Моделювання процесів зміни тиску та теплообміну в локальних гідралічних опорах
	Труба	Моделювання процесів зміни тиску та теплообміну в трубопроводі
Реактори	На базі матеріального балансу	Моделювання процесів хімічних перетворень в різних умовах проведення реакцій
	На базі хімічної рівноваги	
	Кінетичні	

Моделювання фізико-хімічних процесів в блоках, групах блоків та в самих підсистемах спирається на фундаментальні закони збереження енергії та маси. Для математичного опису процесів фізико-хімічних перетворень використовуються рівняння матеріального та енергетичного балансів, які замикаються додатковими співвідношеннями, що враховують особливості конкретного процесу.

Підходи, які сформовані в роботах [8, 9], пропонують при математичному моделюванні процесів у обраному класі явищ (КЯ) визначати мінімальне значення розрахункової похибки, щоб підтвердити прийнятність обраної моделі. В якості універсально-

го показника запропоновано використовувати порівняльну похибку [10, 11]

$$\varepsilon = \Delta u_{\text{pmm}}/S \leq [(z^I - \beta^I)/N_{SI} + (z^II - \beta^II) / (z^I - \beta^I)], \quad (1)$$

де Δu_{pmm} – безрозмірна абсолютна похибка моделі, яка пов'язана з кінцевим числом змінних; S – інтервал значень безрозмірної досліджуваної змінної u ; z^I – кількість фізичних розмірних змінних у обраному КЯ; β^I – кількість первинних фізичних розмірних змінних у обраному КЯ; z^II – кількість фізичних розмірних змінних в обраній моделі; β^II – кількість первинних фізичних розмірних змінних в обраній моделі; N_{SI} – найбільша кількість безрозмірних комплексів.

При дослідженні процесів енергоперетворення в енергетичних установках з семи основних змінних системи SI (L – довжина, M – маса, T – час, I – сила току, Θ – температура, J – інтенсивність світла, F – кількість речовини) використовуються лише три головних: L , M , Θ , а для нестационарних процесів – ще T . Процеси термохімічних перетворень потребують додаткового врахування F .

Досяжна мінімальна порівняльна похибка при моделюванні процесів енергоперетворення в енергетичних установках лежить в широкому діапазоні значень (табл. 2): від (ε_{min}) $LM\Theta = 0,004756$ при стаціонарних процесах тепломасообміну ($KЯ \equiv LM\Theta$) до (ε_{min}) $LMT\Theta F = 0,13307$ при моделюванні нестационарних процесів теплообміну з урахуванням термохімічних перетворень ($KЯ \equiv LMT\Theta F$) [12].

Таблиця 2

Досяжна мінімальна порівняльна похибка відповідно до різних класів явищ [7]

Клас явища	Опис явища	Мінімальна порівняльна похибка ε_{min}
LM Θ	Стаціонарний процес тепломасообміну	0,00476
LM ΘF	Стаціонарний процес тепломасообміну з урахуванням термохімічних перетворень	0,01458
LMT Θ	Нестационарний процес тепломасообміну	0,04457
LMT ΘF	Нестационарний процес тепломасообміну з урахуванням термохімічних перетворень	0,13307

Процедури верифікації та оптимізації процесів в обладнанні енергетичного модулю з термохімічним перетворенням енергії потребують налашту-

вання моделі теплового двигуна з урахуванням існуючих обмежень та вимог. Так, при дослідженні ефективності використання термохімічної обробки палива шляхом регенерації скидної теплоти найчастіше розглядаються характеристики вже існуючих або перспективних ГТД та ДВЗ.

Відповідно до ГТД за базові характеристики приймають параметри: ефективна потужність, питома витрата палива, температура на вході ТВТ, температура газів на виході з двигуна, ступінь регенерації (за наявності).

В варіанті моделювання ДВЗ параметри: ефективна потужність, питома витрата палива, середній ефективний тиск, максимальний тиск згоряння, максимальна температура згоряння.

Математичні моделі ГТД або ДВЗ, при роботі у складі енергомодуля з термохімічною обробкою палива, необхідно налаштувати на обрані базові характеристики. Тому математичні моделі структурно-функціональних блоків і груп блоків (ГТД, ДВЗ та ін.) містять алгоритми розрахунку, в тому числі налаштування на задані характеристики.

Верифікація моделі серійного ГТД відбувається за наступними характеристиками:

– потужність двигуна N_{GT} є фіксованим значенням N_{GT}^{fix} ;

– максимальна температура за камерою згоряння T_3 не повинна перевищувати значення T_3^{fix} .

Відповідно до ГТД розрахункові значення цільової функції повинні відповідати умовам заданого допуску на збіжність:

$$\Delta N_{GT} \leq \Delta N_{GT}^{\text{tol}} \dots \Delta T_3 \leq \Delta T_3^{\text{tol}}, \quad (2)$$

де $\Delta N_{GT} = |N_{GT} - N_{GT}^{\text{fix}}|$ та $\Delta T_3 = |T_3 - T_3^{\text{fix}}|$ – абсолютні похибки значень параметрів.

Встановлено, що за інших рівних умов для цільової функції N_{GT} головною входною змінною є величина масової витрати палива, тобто $N_{GT} = f(G_{\text{fuel}})$. Відповідно до цільової функції T_3 головна входна змінна – масова витрата повітря, тобто $T_3 = f(G_{\text{air}})$.

Коректне завдання початкових параметрів входних змінних значно скорочує час розрахунку та забезпечує потрібну збіжність за меншу кількість ітерацій.

В якості методу збіжності можливо використання методу Вегстайна [13], згідно якого для обчислення змінної використовуються результати двох останніх ітерацій

$$G_{fuelk} = G_{fuelk-1} - \frac{f(G_{fuelk-1})(G_{fuelk-1} - G_{fuelk-2})}{f(G_{fuelk-1}) - f(G_{fuelk-2})}; \quad (3)$$

$$G_{airk} = G_{airk-1} - \frac{f(G_{airk-1})(G_{airk-1} - G_{airk-2})}{f(G_{airk-1}) - f(G_{airk-2})}. \quad (4)$$

На рис. 1 наданий алгоритм налаштування моделі ГТД на фіксовані значення цільових функцій $N_{GT} = f(G_{fuel})$ та $T_3 = f(G_{air})$.



Рис. 1. Алгоритм налаштування моделі ГТД при її верифікації за цільовими функціями $N_{GT} = f(G_{fuel})$ та $T_3 = f(G_{air})$

Верифікація серійного ДВЗ відбувається за наступними головними характеристиками:

- потужність ДВЗ N_e (або середній ефективний тиск P_e) є фіксованим значенням N_e^{fix} (P_e^{fix});
- питома ефективна витрата палива g_e є фіксованим значенням g_e^{fix} ;
- максимальний тиск згоряння P_z не повинна перевищувати значення P_z^{max} ;
- максимальна температура згоряння T_z не повинна перевищувати значення T_z^{max} .

При моделюванні процесів в ДВЗ значення цільової функції повинні відповідати умовам заданого допуску на збіжність:

$$\Delta N_e \leq \Delta N_e^{tol} \dots \Delta g_e \leq \Delta g_e^{tol}, \quad (5)$$

де $\Delta N_e = |N_e - N_e^{fix}|$ та $\Delta g_e = |g_e - g_e^{fix}|$ – абсолютні похибки параметрів.

Визначено, що за інших рівних умов для цільових функцій N_e та g_e головною вхідною змінною є коефіцієнт надлишку повітря α , тобто $N_e = f(\alpha)$ та

$g_e = f(\alpha)$. При цьому одночасно α дозволяє задовольняти умовам $P_z \leq P_z^{max}$ та $T_z \leq T_z^{max}$.

На рис. 2 подано алгоритм налаштування моделі ДВЗ на фіксовані значення цільових функцій $N_e = f(\alpha)$ та $g_e = f(\alpha)$ за умов одночасного виконання $P_z \leq P_z^{max}$ та $T_z \leq T_z^{max}$.

Аналіз наявного потенціалу вторинних енерго-ресурсів ГТД показує, що контур утилізації газотурбінної установки з ТХСУ може також забезпечити її термохімічну обробку палива для ДВЗ.

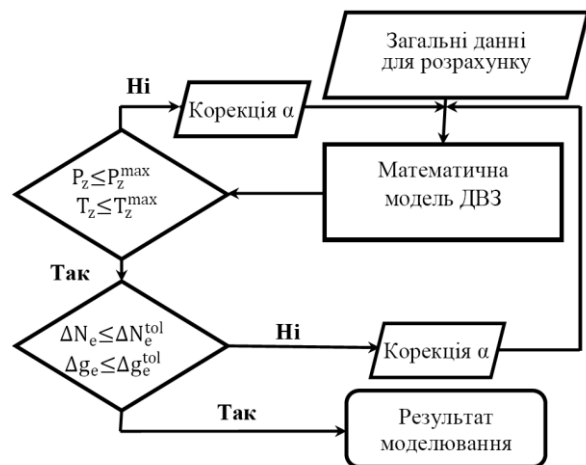


Рис. 2. Алгоритм налаштування моделі ДВЗ при її верифікації за цільовими функціями $N_e = f(\alpha)$ та $g_e = f(\alpha)$

У зв'язку з різноманіттям та складністю процесів в комбінованому дизель-газотурбінному енергетичному комплексі з ТХСУ при моделюванні характеристики ГТД, ДВЗ, підсистеми термохімічної обробки визначались окремо з подальшим зрощуванням отриманих результатів та поєднанням моделей зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків для моделювання загальної схеми енергокомплексу.

2. Результати досліджень

Математичні моделі газотурбінного двигуна, контуру утилізації, блоку термохімічної обробки палива створено за допомогою системи моделювання фізико-хімічних процесів Aspen Plus [7].

Робочі процеси в ДВЗ моделювалися за допомогою програмного комплексу CHEMKIN [14], як наслідок незручності використання структурно-функціональних блоків турбіна та компресор для моделювання процесів розширення та стиснення робочого тіла в циліндрах ДВЗ в Aspen Plus, що виявлено в процесі попередніх розрахунків.

Процеси в циліндрі ДВЗ моделювалися в умовах самозаймання та стиснення однорідного заряду. В моделі враховані конвекційні втрати тепла від газу до стінок циліндра протягом стиснення та розширення (Woschni Correlation).

Реалізована однозонна модель згоряння дозволяє детально моделювати хімічну кінетику для різних палив, припускаючи, що газ в камері згоряння є однорідним, з однорідною температурою, тиском і складом.

Алгоритм розрахунку параметрів та характеристик комбінованого дизель-газотурбінного енергетичного комплексу з термохімічною обробкою палива містить три основні етапи (рис. 3).

Перший етап передбачає налаштування моделей ГТД та ДВЗ на параметри серійних двигунів на номінальному режимі: ефективна потужність двигуна, температура газу за камерою згоряння, ступінь зниження тиску в турбіні або турбінах, ступінь підвищення тиску в компресорі (компресорах), масова витрата повітря, масова витрата еталонного палива

(наприклад, метану). Для ДВЗ обрано параметри на номінальному режимі: ефективна потужність двигуна, питома ефективна витрата палива, ступінь підвищення тиску у турбокомпресорі, максимальний тиск та температура згоряння, геометричні параметри циліндру, фази газоросподілу та кут випередження упорскування (запалення). З метою перевірки адекватності математичної моделі робочого циклу ДВЗ на базі відомих вихідних даних проведений розрахунок та порівняння розрахункових та експериментальних [15, 16, 17]. значень тиску газів у циліндрі дизельного двигуна 6ЧН 12/14. На рис. 4 наведено порівняння експериментальних та змодельованих даних при використанні дизельного палива наступного складу (мол): $C_{10}H_{22} - 0,2$; $C_6H_{12} - 0,05$; $C_{16}H_{34} - 0,3$; $C_6H_6 - 0,45$.

Як видно з наведених даних, максимальна відносна середньоквадратична похибка розрахункових даних, отриманих на основі запропонованої моделі не перевищує 8,5 %.

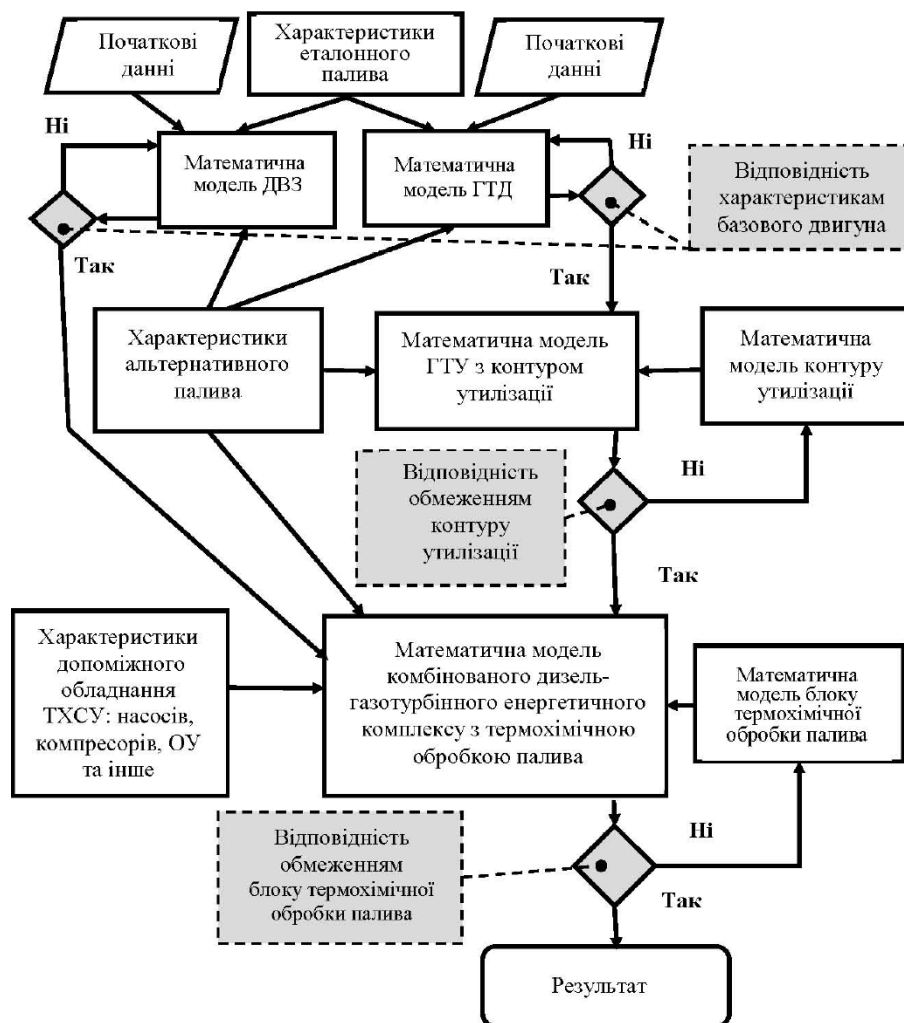


Рис. 3. Схема алгоритму моделювання процесів в енергетичному модулі з ТХСУ

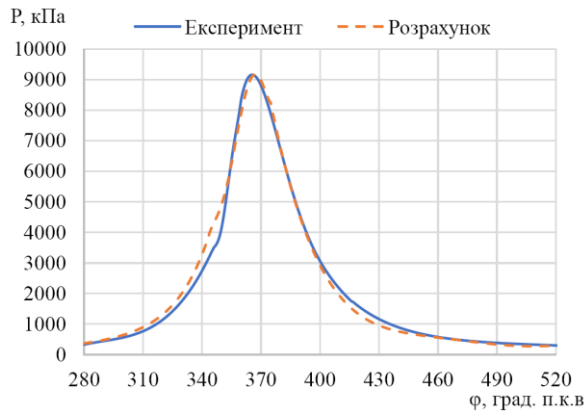


Рис. 4. Залежність зміни тиску P у циліндрі двигуна 6ЧН 12/14 від кута повороту колінчастого валу при роботі на дизельному паливі

Середнє квадратичне відхилення значення індикаторного тиску визначено наступним чином:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2},$$

де x_i – розрахункове значення індикаторного тиску при i -му спостереженні; X_i – експериментальне значення індикаторного тиску; n – кількість спостережень.

При обсязі вибірки 260 значень середнє квадратичне відхилення складає 131 кПа. Для оцінки розрахункового значення індикаторного тиску встановлюються довірчі інтервали та межі при вибраній довірчій імовірності.

Довірчі інтервали визначаються так:

$$I_p = (p_i - t_p \sigma_X; p_i + t_p \sigma_X).$$

Зафіксувавши довірчу ймовірність $P = 0,95$, степінь вільності $k = n - 1$, за таблицею розподілів Стьюдента [18] визначаємо $t_p = 1,96$. Тоді дійсне значення індикаторного тиску з ймовірністю 0,95 знаходиться між довірчими межами $p_i \pm 259$ кПа.

Верифікації математичних моделей ГТД та ДВЗ за параметрами базового двигуна дозволяє виконати подальше їх налаштування на роботу на альтернативному паливі.

На **другому** етапі моделюють процеси у газотурбінній установці з контуром утилізації, де визначають параметри:

– масова витрата альтернативного палива при фіксованому значенні потужності;

– паропродуктивність утилізаційного парогенератора (УПГ) в умовах обмежень мінімальної температури відпрацьованих газів на виході з парове

нератора, яка визначається температурою точки роси відповідно до обраних матеріалів;

– зміна масової витрати повітря з урахуванням дотримання допустимої температури газу за камерою згоряння; витрати механічної енергії на привід пристроїв зміни тиску (насосів), які забезпечують необхідну працездатність системи утилізації.

На **третьому** етапі моделюють процеси в комбінованому дизель-газотурбінному енергетичному комплексі з термохімічною обробкою палива.

Визначаються:

– масова витрата альтернативного палива;

– максимальна досяжна температура процесу обробки палива в термохімічному реакторі;

– паропродуктивність утилізаційного парогенератора в умовах обмежень мінімальної температури відпрацьованих газів на виході з парогенератора;

– зміна масової витрати повітря з урахуванням дотримання допустимої температури газу за камерою згоряння;

– витрати механічної енергії на привід пристроїв зміни тиску (насосів та компресорів), які забезпечують необхідну працездатність систем утилізації та термохімічної обробки палива;

– витрати енергії в опріснювальній установці.

Висновки

1. Запропоновані алгоритми, які забезпечують верифікацію розроблених математичних моделей за показниками існуючих газотурбінних двигунів та ДВЗ, надають можливості коректного налаштування параметрів устаткування дизель-газотурбінних енергетичних комплексів з термохімічною обробкою палива.

2. Математична модель робочого циклу ДВЗ на базі програмного комплексу СЕМКІН забезпечує можливість проводити первинну оцінку ефективності енергоперетворення у робочому циліндрі, визначити екологічні показники, а також раціональне співвідношення параметрів робочого процесу для забезпечення високих ефективних показників двигуна на всіх режимах його експлуатації.

3. Результати оцінки адекватності математичної моделі робочого циклу ДВЗ на базі програмного комплексу СЕМКІН показали задовільне узгодження отриманих результатів з експериментальними даними (максимальна середньоквадратична похибка розрахункових даних, отриманих на основі моделі, знаходиться у межах 8,5 %).

Література

1. Носач, В. Г. *Енергія топлива [Текст]* / В. Г. Носач. – К. : Наук. думка. – 1989. – 148 с.

2. Чередниченко, А. К. Применение термохимической утилизации в энергетических установках высокотехнологичных судов [Текст] / А. К. Чередниченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 7 (159). – С. 58–64. DOI: 10.32620/akt.2019.7.07.

3. Экспериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ із системою термохімічної конверсії біоетанолу [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов [та ін.] // *Двигуни внутрішнього згорання*. – 2011. – № 2. – С. 3–8.

4. Cherednichenko, O. Efficiency Analysis of Methanol Usage for Marine Turbine Power Plant Operation Based on Waste Heat Chemical Regeneration [Text] / O. Cherednichenko // *Problemele Energeticii Regionale* – 2019. – No. 1. – P. 102-111. DOI: 10.5281/zenodo.2650429.

5. Чередниченко, А. К. Моделирование энергокомплексов с термохимической регенерацией тепла для судов газозовозов [Текст] / А. К. Чередниченко // *Вестник двигателестроения*. – 2016. – № 2. – С. 36–41.

6. Integration of different models in the design of chemical processes: Application to the design of a power plant [Text] / J. Caballero, M. Navarro, R. Femenia, I. Grossmann // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 124. – P. 256–273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.018.

7. Haydary, J. Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications [Text] / J. Haydary. – Bratislava : John Wiley & Sons. – 2018. – 448 p.

8. Менин, Б. М. Универсальная метрика расчёта погрешности математической модели технологического процесса и конструкций холодильного оборудования [Текст] / Б. М. Менин // *Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование*. – 2016. – № 4. – С. 16–22. DOI: 10.17586/2310-1148-2016-9-4-16-22.

9. Kat, C.-J. Validation metric based on relative error [Text] / C.-J. Kat, P. S. Els // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences*. – 2012. – Vol. 18, Iss. 5. – P. 487-520. DOI: 10.1080/13873954.2012.663392.

10. Brillouin, Leon. Science and Information Theory [Text] / Leon Brillouin. – Dover Books on Physics, Courier Corporation. – 2013. – 351 p.

11. Menin, B. M. Comparative error of the phenomena model [Text] / B. M. Menin // *Intern. Referred Journal of Engineering and Science*. – 2014. – Vol. 3, Iss. 11. – P. 68-76.

12. Чередниченко, О. К. Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для високотехнологічних суден і морських об'єктів на-

фтогазовидобування [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / О. К. Чередниченко ; наук. консультант С. І. Сербін ; НУК. – Миколаїв, 2020. – 382 с.

13. Verbuck, V. M. Veckstein's method as a modification of the transversal method [Text] / V. M. Verbuck, D. I. Milman // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 1977. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 215–216. DOI: 10.1016/0041-5553(77)90052-0.

14. ANSYS Chemkin Theory Manual 17.0 (15151) [Text]. – Reaction Design : San Diego. – 2015. – 324 p.

15. Ткач, М. Р. Экспериментальное исследование работы судового ДВС на альтернативном топливе [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, Б. А. Тхы // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2006. – № 2. – С. 114-118.

16. Особливості математичного моделювання процесу згорання поршневих двигунів працюючих з добавками синтез-газу [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов [и др.] // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2017. – № 9 (144). – С. 14–18.

17. Характеристики процесса сгорания двигателя 2Ч 7,2/6 с добавками до 65% синтез-газа к бензину [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов [и др.] // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2015. – № 1. – С. 33–37.

18. Иванов, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] : учеб. для вузов / Г. М. Иванов, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.

References

1. Nosach, V. G. *Energiya topliva* [Energy of Fuel]. Kyiv, Nauk. dumka Publ., 1989. 148 p.

2. Cherednychenko, A. K. Primenenie termohimicheskoy utilizatsii v energeticheskikh ustanovkakh vysokotekhnologichnykh sudov [Application of thermochemical waste heat recovery in power plants of high-tech ships]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 7 (159), pp. 58–64. DOI: 10.32620/akt.2019.7.07.

3. Tymoshevskiy, B. G., Tkach, M. R., Mytrofanov, O. S., Poznanskyj, A. S., Proskurin, A. Yu. Eksperimentalne doslidzhennya parametriv porshneвого DVZ iz systemoyu termoximichnoyi konversiyi bioetanolu [Experimental study of the parameters of a reciprocating internal combustion engine with a system of thermochemical conversion of bioethanol]. *Dvyguny vnutrishnogo zgoryannya – Internal combustion engine*, 2011, no. 2, pp. 3–8.

4. Cherednichenko, O. Efficiency Analysis of Methanol Usage for Marine Turbine Power Plant Operation Based on Waste Heat Chemical Regenera-

tion. *Problemele Energeticii Regionale*, 2019, iss. 1, pp. 102–111. DOI: 10.5281/zenodo.2650429.

5. Cherednychenko, A. K. Modelirovanie ènergokompleksov s termohimičeskoj regeneraciej tepla dlâ sudov gazovozov [Modeling of efficiency of ship power plants with thermochemical heat recovery for liquefied natural gas carriers]. *Vestnyk dvygatelstroenyua – Herald engine building*, 2016, no. 2, pp. 36–41.

6. Caballero, J., Navarro, M., Femenia, R., Grossmann I. Integration of different models in the design of chemical processes: Application to the design of a power plant. *Applied Energy*, 2014, vol. 124, pp. 256–273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.018.

7. Haydary, J. *Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications*. Bratislava : John Wiley & Sons, 2018. 448 p.

8. Menyn, B. M. . Universal'naâ metrika rasčeta pogrešnosti matematičeskoj modeli tehnologičeskogo processa i konstrukcij holodil'nogo oborudovaniâ [Universal metric of calculation of mathematical model uncertainty for technological processes and constructions of refrigeration equipment]. *Scientific Journal of St Petersburg State University of Low Temperature and Food Technologies: Refrigeration and Air Conditioning*, 2016, no. 4, pp. 16–22. DOI: 10.17586/2310-1148-2016-9-4-16-22.

9. Kat, C.-J., Els, P. S. Validation metric based on relative error. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences*, 2012, no. 18 (5), pp. 487–520, DOI: 10.1080/13873954.2012.663392.

10. Brillouin, Leon. *Science and Information Theory*. Dover Books on Physics, Corporation, 2013. 351 p.

11. Menin, B. M. Comparative error of the phenomena model. *Intern. Referred Journal of Engineering and Science*, 2014, vol. 3, iss. 11, pp. 68–76.

12. Cherednichenko, O. K. *Efektivnist energetychnykh ustanovok z termoximichnymi systemamy dlya vysokotekhnologichnykh suden i morskyykh ob'yektiv naftogazovydobuvannya. Diss. dokt. tekhn. nauk*

[Efficiency of power plants with thermochemical systems for high-tech ships and offshore oil and gas facilities. Dr. eng. sci. diss.]. NUK, Mykolayiv, 2020. 382 p.

13. Verbuck, V. M., Milman, D. I. Veckstein's method as a modification of the transversal method. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1977, vol. 17, iss. 2, pp. 215–216. DOI: 10.1016/0041-5553(77)90052-0.

14. *ANSYS Chemkin Theory Manual 17.0 (15151)*. Reaction Design, San Diego, 2015. 324 p.

15. Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. G., Thy, B. A. Èksperimental'noe issledovanie raboty sudovogo DVS na al'ternativnom toplive [Experimental study of the operation of marine internal combustion engines on alternative fuels]. *Dvyguny vnutrishnogo zgoryannya – Internal combustion engine*, 2006, no. 2, pp. 114–118.

16. Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. G., Mytrofanov, O. S., Poznanskyj, A. S., Proskurin, A. Yu. Osoblyvosti matematychnogo modelyuvannya processu zgoryannya porshnevnykh dvyguniv pracuyuyuchykh z dobavkamy sintez-gazu [Features of mathematical modeling of the combustion process of reciprocating engines operating with synthesis gas additives] *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 9 (144), pp. 14–18.

17. Tymoshevskiy, B. G., Tkach, M. R., Mytrofanov, O. S., Poznanskyj, A. S. Harakteristiki processa sgoraniâ dvigatelâ 2Ĉ 7,2/6 s dobavkami do 65% sintez-gaza k benzinu [Characteristics of the 2 cylinder 4-stroke engine 7,2/6 with additives to 65% of synthesis gas to gasoline]. *Dvyguny vnutrishnogo zgoryannya – Internal combustion engine*, 2015, no. 1. pp. 33–37.

18. Ivanov, G. M., Kuznecov, N. D., Chystyakov, V. S. *Teplotekhnicheskiye izmereniya i pribory* [Heat engineering measurements and devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 232 p.

Надійшла до редакції 20.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF DIESEL-GAS TURBINE POWER PLANTS WITH THERMOCHEMICAL TREATMENT OF FUEL

*Oleksandr Cherednichenko, Mykhaylo Tkach,
Oleksandr Mytrofanov, Dmytro Kostenko*

This paper discussed the methodological aspects of the study using methods of mathematical modeling of processes in ship power plants with thermochemical fuel treatment. The results of the study of physical and chemical processes in structural and functional blocks, simulating individual links of the thermodynamic cycle, are consid-

ered. The combination of blocks with links in the form of material and energy flows makes it possible to model the complete scheme of the mathematical model of the power module. Due to the diversity and complexity of the processes in the combined diesel-gas turbine power complex with a thermochemical fuel treatment system, when modeling, the characteristics of the power equipment were determined separately, followed by merging the results obtained and combining the models with links in the form of material and energy flows. Mathematical models of a gas turbine engine, a recycling circuit, a thermochemical fuel treatment unit were created using the Aspen Plus physical and chemical processes modeling system. Working processes in the internal combustion engine were modeled using the CHEMKIN software package. It has been proven that the universal mathematical models of heat engines, which are part of the power module with thermochemical fuel treatment, require adjustment of the selected basic characteristics. Therefore, mathematical models of structural-functional blocks and groups of blocks contain algorithms for setting up models when they are verified by objective functions. The proposed algorithms provide verification of the developed mathematical models in terms of existing or prospective gas turbine engines and internal combustion engines. These algorithms provide the possibility of correct adjustment of the equipment parameters of diesel-gas turbine power complexes with thermochemical fuel treatment. The mathematical model of the internal combustion engine operating cycle based on the CHEMKIN software package provides an opportunity to conduct a primary assessment of the efficiency of energy conversion in the working cylinder. The results of evaluating the adequacy of the mathematical model of the ICE operating cycle based on the CHEMKIN software package showed a satisfactory agreement between the obtained results and experimental data. The maximum root-mean-square error of the calculated data obtained on the basis of the model is within 8.5%.

Keywords: ship power plant; thermochemical fuel treatment; gas turbine engine; mathematical modeling.

Чердніченко Олександр Костянтинівич – д-р техн. наук, доц., проф. каф. експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Митрофанов Олександр Сергійович – д-р техн. наук, доц., доц. каф. двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Костенко Дмитро Валерійович – канд. техн. наук, доц., зав. каф. електричної інженерії судових та роботизованих комплексів, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Oleksandr Cherednichenko – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor of Department of Ship Power Plants Operation & Heat-power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: oleksandr.cherednichenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5745-8117, ResearcherID: K-3554-2018.

Mykhaylo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4944-7113, Scopus Author ID: 57202210289.

Oleksandr Mytrofanov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: oleksandr.mytrofanov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3460-5369, Scopus Author ID: 57211371053.

Dmytro Kostenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Electrical engineering of ship and robotic complexes, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: dmytro.kostenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1164-3066.