

УДК 621.45.026.2

doi: 10.32620/aktt.2024.5.01

М. А. ШЕВЧЕНКО, М. В. АМБРОЖЕВИЧ, О. Г. СЕЛЕЗЕНЬ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ НА ЕТАНОЛІ

Етанол є одним із найбільш перспективних альтернативних видів палива для України. Для конвертування на етанол існуючих проєктів електростанцій і когенераційних установок на базі газотурбінних двигунів (ГТД), що працюють на продуктах нафтопереробки та природного газу, на етанол, а також їх проєктування і розрахунку характеристик, необхідно мати математичну модель робочого процесу камери згоряння (КЗ). **Об'єкт дослідження** – робочий процес у КЗ ГТД, що працює на етанолі. **Предмет дослідження** – математична модель робочого процесу у КЗ ГТД, що працює на етанолі. **Метою роботи** є удосконалення математичної моделі робочого процесу КЗ ГТД, яка працює на етанолі, шляхом зміни алгоритму розрахунку відносної витрати палива з урахуванням термічної дисоціації продуктів згоряння та коректно складеного еквівалентного шляху хімічної реакції процесу горіння. Для досягнення мети дослідження були вирішені наступні **завдання**: удосконалена математична модель КЗ, що базується на використанні експериментальних значень питомих ізобарних теплоємностей продуктів згоряння, які є функцією температури і тиску («спрощена» математична модель); розроблена математична модель КЗ, що базується на вирішенні системи рівнянь хімічної термодинаміки («складна» математична модель); порівняно «спрощену» математичну модель робочого процесу КЗ зі «складною» математичною моделлю. Отримані такі **результати**: різниця розрахунку термодинамічних параметрів продуктів згоряння між «спрощеною» та «складною» математичними моделями склала менше 1,2% за трьома режимами роботи двигуна CF6-80A фірми «General Electric». **Висновки**: удосконалено «спрощену» математичну модель КЗ ГТД, яка працює на етанолі. Особливістю цієї моделі є неявне врахування впливу термічної дисоціації та коректно складеного еквівалентного шляху хімічної реакції шляхом використання експериментальних значень питомих ізобарних теплоємностей продуктів згоряння. Це дозволить покращити точність розрахунку відносної витрати палива та інших термодинамічних параметрів в математичних моделях КЗ ГТД, які працюють на етанолі, без значного ускладнення алгоритму моделі.

Ключові слова: відносна витрата палива; камера згоряння; етанол; істинна питома ізобарна теплоємність; ентальпія; продукти згоряння; математична модель камери згоряння.

1. Вступ

Використання централізованого виробництва електроенергії, яке значною мірою було забезпечено за рахунок імпорту енергетичної сировини (нафти, газу, бензину) з інших країн, призвело до значного погіршення енергетичної, і як наслідок, національної безпеки України.

Наразі, необхідно приймати короткочасні технічні рішення, щодо створення нових об'єктів генерації електричної енергії країни. При цьому ці рішення мають задовольняти наступним вимогам:

1. Мати децентралізовану систему джерел електро – і теплопостачання.
2. Знизити залежність держави від імпорту енергоносіїв.
3. Виконання забор'язань щодо Кіотського протоколу – зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище.

4. Сприяти підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних товарів та послуг.

Україна має налагоджене виробництво мобільних електростанцій і когенераційних установок на базі газотурбінних двигунів (ГТД) потужністю від 0,3 до 325 МВт [1, 2]. Основним недоліком вже існуючих проєктів на базі ГТД є використання в якості палива продуктів нафтопереробки та природного газу, що не відповідає вимогам 2 – 4 з вище наведеного списку. Альтернативні види палива дозволять забезпечити їх виконання [3, 4].

Зважаючи на те, що Україна має значний аграрний і промисловий потенціали в області виробництва етанолу [4, 5], та постійно зростаючи в ньому потреби у світі [5], робить найбільш доцільними його використання в якості альтернативного палива для мобільних електростанцій і когенераційних установок на базі



ГТД [6, 7]. Крім того, достатньо проста конвертація ГТД з одного типу палива на інше [7, 8] не вимагає значних витрат на переведення існуючих проєктів електростанцій і когенераційних установок на етанол. Суттєво змінюється робочий процес горіння в камері згоряння (КЗ), що потребує врахування в математичній моделі (ММ), яка його описує.

Для конвертування існуючих проєктів електростанцій і когенераційних установок, що працюють на етанолі, а також їх проєктування і розрахунку характеристик, необхідно мати ММ робочого процесу КЗ. Тому розробка ММ КЗ ГТД, що працює на етанолі, є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

ММ КЗ повинна враховувати вплив термічної дисоціації продуктів згоряння (ПЗ) та коректо складений еквівалентний шлях хімічної реакції, а також мати простоту імплементації у вже існуючі математичні моделі ГТД.

В [9, 10] розроблено ММ КЗ, яка враховує вплив термічної дисоціації ПЗ та коректо складений еквівалентний шлях хімічної реакції. ММ КЗ базується на використанні експериментальних значень ентальпій або питомих ізобарних теплоємностей c_p продуктів згоряння як функції температури T і тиску p [11, 12], що забезпечує легкість її імплементації в існуючі ММ ГТД.

Однак ММ КЗ [9] і [10] розроблені для КЗ, що працюють на газі та метанолі відповідно. Рівняння хімічної термодинаміки для газу, метанолу та етанолу мають відмінності. Таким чином, необхідно розробити ММ робочого процесу КЗ ГТД, що працює на етанолі та враховує термічну дисоціацію продуктів згоряння та коректно складений еквівалентний шлях хімічної реакції процесу горіння.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є удосконалення ММ робочого процесу КЗ ГТД, яка працює на етанолі, шляхом зміни алгоритму розрахунку відносної витрати палива з урахуванням термічної дисоціації ПЗ та коректно складеного еквівалентного шляху хімічної реакції процесу горіння.

Для досягнення мети треба вирішити наступні завдання:

- удосконалити ММ робочого процесу КЗ, яка працює на етанолі і базується на використанні експериментальних значень c_p ПЗ і є функцією T та p – «спрощена» ММ (п. 5.1);

- розробити ММ робочого процесу КЗ, яка працює на етанолі і базується на вирішенні системи рівнянь хімічної кінетики – «складна» ММ (п. 5.2);

- розрахунковим шляхом одержати значення відносної витрати пального для основних режимів роботи обраного ГТД «спрощеною» ММ робочого процесу КЗ (п. 6.1);

- розрахунковим шляхом одержати точний мольний склад та загальні характеристики ПЗ етанолу у повітрі «складною» ММ робочого процесу КЗ (п. 6.2);

- порівняти результати розрахунку загальних характеристик ПЗ етанолу за «спрощеною» ММ робочого процесу КЗ з їх значеннями, отриманими за «складною» ММ (п. 6.3).

4. Метод дослідження

Задача вирішується шляхом математичного моделювання процесів, що відбуваються в КЗ ГТД.

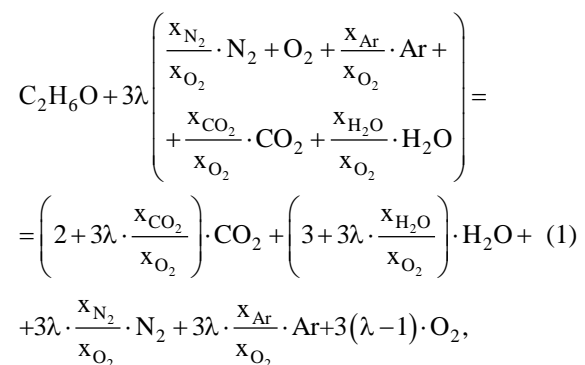
ММ КЗ повинна дозволяти розраховувати склад робочого тіла, параметри потоку на вході та на виході з камери, відносну витрату пального, знаючи параметри потоку на вході, геометрію камери та температуру на виході (витрату палива).

Пропоновані математичні моделі ґрунтуються на розв'язанні рівнянь хімічної термодинаміки для процесу горіння, що можна отримати за умови адіабатної реакції окиснення, яка протікає в КЗ ГТД.

5. Результати дослідження робочого процесу камери згоряння газотурбінного двигуна, що працює на етанолі

5.1. «Спрощена» математична модель камери згоряння

Хімічна реакція згоряння етанолу C_2H_5OH в повітрі з надлишком окиснювача λ може бути представлена рівнянням (1):



де x_i – мольна частка компонента. Множник 3, що стоїть перед коефіцієнтом надлишку окиснювача λ ,

відповідає стехіометричному співвідношенню пального та окиснювача.

Повітря вважається сумішшю п'яти газів – азоту, кисню, водяної пари, вуглекислого газу та аргону. Його склад відомий.

Питома нижча теплотворна здатність палива H_u при відомому складі палива визначається за формулою Менделєєва, чи береться із довідника і складає для рідкого етанолу

$$H_u = 1367,88 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} = 29694 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Стехіометрична кількість вологого повітря L_0 для повного згоряння 1 кг палива заданого складу визначається за формулою

$$L_0 = \frac{\mu_{O_2}}{g_{O_2}} \left(\frac{g_C}{\mu_C} + \frac{1}{4} \frac{g_H}{\mu_H} - \frac{1}{2} \frac{g_O}{\mu_O} \right), \quad (2)$$

де g_i – масова частка компонента палива;

μ_i – молярна маса хімічного елементу.

Для метанолу $L_0 = 9,095$.

Питому ентальпію продуктів згоряння на виході з КЗ визначаємо як [9]:

$$\Delta h_r^* = \sum_{i=1}^n g_i \Delta h_i^*, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_i^* &= c_{p_{aai}} \cdot (T_i^* - T_0) = \\ &= \frac{1}{p_i - p_0} \int_{p_0}^{p_i} \left(\int_{T_0}^{T_i^*} c_p(T, p) dT \right) dp, T_i^*, \end{aligned} \quad (4)$$

де $c_{p_{aai}}$, кДж/кг К – середньоінтегральна питома ізобарна теплоємність компонента у заданому діапазоні температур від T_0 до T_i^* та тисків – від p_0 до p_i ;

T_i^* , К – температура виходу T_r^* або входу $T_{вх}^*$ КЗ; $T_0 = 298$ К – температура, прийнята за базову в завданнях термохімії, для якої відомі стандартні ентальпії утворення речовин; p_i і p_0 парціальні тиски компонентів суміші в кінці і на початку процесу інтегрування.

Парціальні тиски компонентів суміші визначаються як

$$p_i = \sum_{i=1}^n X_i p_{cm}, \quad (5)$$

де p_{cm} , Па – тиск суміші.

Теплоємності повітря та продуктів згоряння ви-

значаються за парціальними тисками та температурами на вході та виході з КЗ.

Визначення $q_{п}$ базується на методі «предиктор-коректор». В першому наближенні $q_{п}$ визначається за формулою [9]

$$q_{п} = \frac{1}{\frac{H_u \cdot \eta_r}{\Delta h_r^* - \Delta h_{вх}^*} - 1}, \quad (6)$$

використовуючи поліноми середніх теплоємностей, які залежать тільки від температури на вході та виході з камери згоряння. Наприклад [13] або [14]. Тут η_r – коефіцієнт повноти згоряння палива.

Отримане значення $q_{п}$ є початковим наближенням наступної ітерації.

На кожній ітерації, за відомим складом суміші, T та p , визначають ентальпії газової суміші на вході та виході з КЗ. Потім, використовуючи рівняння теплового балансу КЗ, обчислюється розрахункове значення температури на виході з КЗ $T_{Гр}^*$

$$T_{Гр}^* = \frac{H_u \eta_r q_{п} + \Delta h_{вх}^*}{c_{p_{aа.г}}}. \quad (7)$$

В якості умови завершення ітераційною процедури використовують значення $\Delta T_{Г}^*$

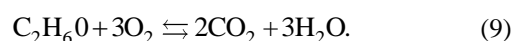
$$\Delta T_{Г}^* = \frac{T_{Г3}^* - T_{Гр}^*}{T_{Г3}^*} 100, \quad (8)$$

де $T_{Г3}^*$, К – задана температура на виході з КЗ;

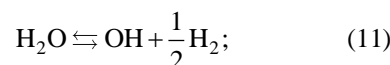
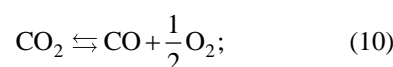
Ітераційна процедура припиняється, коли $\Delta T_{Г}^*$ стає меншою за малу наперед задану величину.

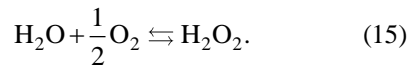
5.2. «Складна» математична модель камери згоряння

Реакція повного окиснювання етанолу

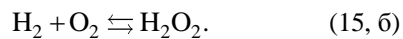


При термічній дисоціації продуктів згоряння етанолу у повітрі виникають наступні рівняння:

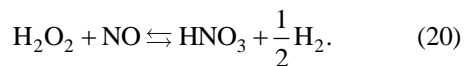
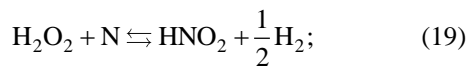
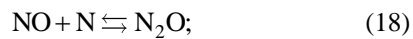
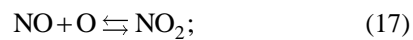
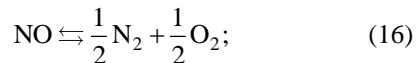




Рівняння (15) можна представити у вигляді (15, а) або (15, б):



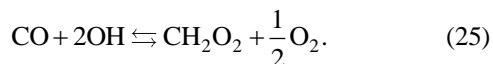
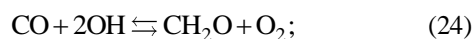
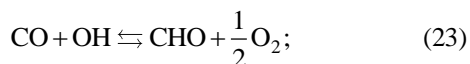
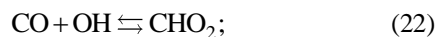
Азотовмісні сполуки:



Аргон – інертний, не реагує:



Крім того, в невеликих кількостях з'являються з'єднання виду $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_k$ (CHO , CHO_2 , CH_2O , CH_2O_2), рівняння виникнення (дисоціації) яких



Попередні розрахунки показали, що у рівноважному стані концентрація зазначених речовин у продуктах згоряння зникаюче мала, тому у подальших розрахунках такі сполуки не враховувалися.

Система рівнянь, що містить 18 невідомих величин – 17 парціальних тисків продуктів згоряння CO_2 , H_2O , H_2 , O_2 , N_2 , Ar , OH , H_2O_2 , CO , H , O , N , NO , N_2O , NO_2 , HNO_2 , HNO_3 і температуру згоряння T_r , замкнута рівняннями балансу маси і рівнянням Дальтона.

Закон Дальтона (сума парціальних тисків дорівнює тиску суміші)

$$p_r = \sum_{i=1}^{17} p_i. \quad (26)$$

Система рівнянь для знаходження парціальних тисків компонентів суміші складається з 12 рівнянь, що пов'язують відношення парціальних тисків з константами хімічної рівноваги:

$$K_{p_1} = \frac{p_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}} \cdot p_{\text{O}_2}^3}{p_{\text{CO}_2}^2 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^3}; \quad (27)$$

$$K_{p_2} = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{O}_2}^{0.5}}; \quad (28)$$

$$K_{p_3} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{OH}} \cdot p_{\text{H}_2}^{0.5}}; \quad (29)$$

$$K_{p_4} = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}}^2}; \quad (30)$$

$$K_{p_5} = \frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}}^2}; \quad (31)$$

$$K_{p_6} = \frac{p_{\text{N}_2}}{p_{\text{N}}^2}; \quad (32)$$

$$K_{p_7} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{O}_2}^{0.5}}{p_{\text{H}_2\text{O}_2}}; \quad (33)$$

$$K_{p_8} = \frac{p_{\text{NO}}}{p_{\text{N}_2}^{0.5} \cdot p_{\text{O}_2}^{0.5}}; \quad (34)$$

$$K_{p_9} = \frac{p_{\text{NO}}}{p_{\text{N}_2}^{0.5} \cdot p_{\text{O}_2}^{0.5}}; \quad (35)$$

$$K_{p_{10}} = \frac{p_{\text{NO}} \cdot p_{\text{N}}}{p_{\text{N}_2\text{O}}}; \quad (36)$$

$$K_{p_{11}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}_2} \cdot p_{\text{N}}}{p_{\text{HNO}_2} \cdot p_{\text{H}}^2}; \quad (37)$$

$$K_{p_{12}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}_2} \cdot p_{\text{NO}}}{p_{\text{HNO}_3} \cdot p_{\text{H}}^2}. \quad (38)$$

Константи реакцій хімічної рівноваги за парціальними тисками K_{p_i} залежать тільки від температури і можуть бути взяті з таблиць, або розрахованими за формулою на основі умови мінімуму енергії Гіббса Z (ізобарно-ізотермічного потенціалу) від температури.

Зміна енергії Гіббса реакції при стандартному тиску ($p_0 = 101325 \text{ Па}$)

$$\Delta Z = \Delta I - T\Delta S, \quad (39)$$

де ΔI , кДж/кмоль – зміна ентальпії в реакції при p_0 та T_0 ;

ΔS , кДж/(кмоль·К) – зміна ентропії в реакції при p_0 та T_0 ;

R_0 , кДж/(кмоль·К) – універсальна газова постійна.

Зміна ентальпії та ентропії

$$\Delta I = \sum_{i=1}^N v_i I_i; \quad (40)$$

$$\Delta S = \sum_{i=1}^N v_i S_i; \quad (41)$$

де v – стехіометричний коефіцієнт рівняння реакції для i – го компонента газової суміші, позитивний для продуктів реакції і негативний для реагентів.

Тоді константа реакції хімічної рівноваги за парціальним тиском

$$K_p = \exp\left(-\frac{\Delta Z}{R_0 T}\right) = \exp\left(\frac{\Delta S}{R_0}\right) \exp\left(-\frac{\Delta I}{R_0 T}\right). \quad (42)$$

Маса вуглецю С, водню Н, кисню О у 1 кг палива – етанолу:

$$m_C^n = \frac{2\mu_C}{\mu_{C_2H_6O}}; \quad (43)$$

$$m_H^n = \frac{6\mu_H}{\mu_{C_2H_6O}}; \quad (44)$$

$$m_O^n = \frac{\mu_O}{\mu_{C_2H_6O}}. \quad (45)$$

Загальна маса повітря – окисника дорівнює

$$m_{air} = \lambda \frac{1}{x_{O_2}} \frac{\mu_{air}}{\mu_{C_2H_6O}} = \lambda L_0. \quad (46)$$

Маса азоту N, аргону Ar, вуглецю С, водню Н, кисню О в 1 кг повітря – окисника

$$m_N^o = x_{N_2} \frac{2\mu_N}{\mu_{air}}; \quad (47)$$

для водню і вуглецю

$$\frac{m_H}{m_C} = \frac{\mu_H}{\mu_C} \frac{[2p_{H_2O} + p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_H + 2p_{H_2O_2} + p_{HNO_2} + p_{HNO_3}]}{[p_{CO_2} + p_{CO}]}; \quad (58)$$

для азоту і вуглецю

$$\frac{m_N}{m_C} = \frac{\mu_N}{\mu_C} \frac{[2p_{N_2} + p_N + p_{NO} + 2p_{N_2O} + p_{NO_2} + p_{HNO_2} + p_{HNO_3}]}{[p_{CO_2} + p_{CO}]}; \quad (59)$$

для кисню і вуглецю

$$m_{Ar}^o = x_{Ar} \frac{\mu_{Ar}}{\mu_{air}}; \quad (48)$$

$$m_C^o = x_{CO_2} \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{air}} \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} = x_{CO_2} \frac{\mu_C}{\mu_{air}}; \quad (49)$$

$$m_H^o = x_{H_2O} \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{air}} \frac{2\mu_H}{\mu_{H_2O}} = x_{H_2O} \frac{2\mu_H}{\mu_{air}}; \quad (50)$$

$$\begin{aligned} m_O^o &= x_{O_2} \frac{2\mu_O}{\mu_{air}} + x_{H_2O} \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{air}} \frac{\mu_O}{\mu_{H_2O}} + x_{CO_2} \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{air}} \frac{2\mu_C}{\mu_{CO_2}} = \\ &= x_{O_2} \frac{2\mu_O}{\mu_{air}} + x_{H_2O} \frac{\mu_O}{\mu_{air}} + x_{CO_2} \frac{2\mu_C}{\mu_{air}}. \end{aligned} \quad (51)$$

Загальна маса азоту N, аргону Ar, вуглецю С, водню Н, кисню О у реагентах:

$$m_N = \lambda L_0 m_N^o = \lambda L_0 x_{N_2} \frac{2\mu_N}{\mu_{air}}; \quad (52)$$

$$m_{Ar} = \lambda L_0 m_{Ar}^o = \lambda L_0 x_{Ar} \frac{\mu_{Ar}}{\mu_{air}}; \quad (53)$$

$$m_C = m_C^n + \lambda L_0 m_C^o = \frac{2\mu_C}{\mu_{C_2H_6O}} + \lambda L_0 x_{CO_2} \frac{\mu_C}{\mu_{air}}; \quad (54)$$

$$m_H = m_H^n + \lambda L_0 m_H^o = \frac{6\mu_H}{\mu_{C_2H_6O}} + \lambda L_0 x_{H_2O} \frac{2\mu_H}{\mu_{air}}; \quad (55)$$

$$\begin{aligned} m_O &= m_O^n + \lambda L_0 m_O^o = \frac{\mu_O}{\mu_{C_2H_6O}} + \\ &+ \lambda L_0 \left(x_{O_2} \frac{2\mu_O}{\mu_{air}} + x_{H_2O} \frac{\mu_O}{\mu_{air}} + x_{CO_2} \frac{2\mu_C}{\mu_{air}} \right). \end{aligned} \quad (56)$$

Таким чином може бути обчислене відношення мас окремих речовин у реагентах. З іншого боку, відношення мас окремих речовин у продуктах реакції може бути подано через парціальні тиски газів.

Так, для аргону і вуглецю

$$\frac{m_{Ar}}{m_C} = \frac{\mu_{Ar}}{\mu_C} \frac{p_{Ar}}{[p_{CO_2} + p_{CO}]}; \quad (57)$$

$$\frac{m_O}{m_C} = \frac{\mu_O}{\mu_C} \frac{[PC_2H_6O + 2PCO_2 + PCO + 2PO_2 + PO + PH_2O + POH + 2PH_2O_2 + PNO + PN_2O + 2PNO_2 + 2PHNO_2 + 3PHNO_3]}{[PCO_2 + PCO]} \quad (60)$$

Мольна доля компонента ПЗ дорівнює

$$x_i = P_i / P_{\Gamma} = P_i / \sum_{i=1}^{17} P_i \quad (61)$$

До отриманих 13 рівнянь (26) – (38) додаються ще 5 рівнянь закону збереження маси (52) – (56) – за кількістю хімічних елементів, що беруть участь у реакції.

Таким чином, було отримано замкнуту систему із 18 рівнянь (26) – (38), (54), (57) – (60) з 18 невідомими. Праві частини рівнянь (57) – (60) обчислюють за допомогою співвідношень (52) – (56).

6. Результати розрахунку параметрів камери згоряння розробленими математичними моделями

6.1. Загальні вихідні дані для розроблених математичних моделей

Хімічний склад етанолу наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад етанолу

Компонент	Мольна доля x_i	Масова доля g_i
Вуглець С	2/9=0,22222	0,52142
Водень Н	6/9=0,66667	0,13127
Кисень О	1/9=0,11111	0,34731

Хімічний склад атмосферного повітря при $p_{atm}=101325$ Па; $t_{atm}=27$ °С; $d=10$ г/кг сухого повітря, молярна маса вологого повітря 28,792 кг/кмоль представлений у табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад атмосферного повітря

Компонент	Хімічна формула	Мольна доля x_i	Масова-доля g_i
Азот	N ₂	0,76848	0,74771
Кисень	O ₂	0,20616	0,22912
Аргон	Ar	0,00922	0,01279
Вуглекислий газ	CO ₂	0,00031	0,00048
Водяна пара	H ₂ O	0,01582	0,00990

Розрахунок значень відносної витрати пального проводиться для основних режимів роботи ГТД CF6-80A при використанні в якості палива етанолу.

Параметри основних режимів роботи ГТД CF6-80A наведені у таблиці 3 [12].

Таблиця 3

Значення параметрів ГТД для основних режимів роботи

Режим	Параметри на вході в камеру згоряння			T_{Γ}^* , К	η , %
	$T_{вх}$, К	$P_{вх}$, МПа	G , кг/с		
Зниження на посадку, 30% тяги	614	1,102	7,1	1039	99,8
Набір висоти	772	2,426	13,4	1339	99,9
Зліт	805	2,789	15	1482	99,8
Крейсерський мінімальний	608	0,621	4	985	99,9
Крейсерський нормальний	686	0,936	5,5	1207	99,9
Крейсерський максимальний	726	1,132	6,4	1286	99,9

Втрати повного тиску КЗ задавались відповідно до роботи [13].

6.2. Результати розрахунку відносної витрати пального, «спрощеною» математичною моделлю

Вихідними даними для «спрощеної» ММ КЗ ГТД є: склад палива та окиснювача, температура входу та виходу з КЗ, тиск на вході в КЗ, втрати повного тиску в КЗ, коефіцієнт повноти згоряння палива.

Результати розрахунку ϵ : $\mu_{ПЗ}$, R , c_p , $c_{раа}$, показник ізоентропи k , q_p . Значення q_p для основних режимів роботи ГТД CF6-80A наведено на рис. 1.

Відносна витрата палива буде використана в якості вихідних даних для «складної» ММ КЗ ГТД.

6.3. Результати розрахунку точного мольного складу продуктів згоряння етанолу у повітрі, «складною» математичною моделлю

Вихідними даними «складної» ММ КЗ ГТД є: склад палива та окиснювача, температура реагентів на вході в КЗ, тиск в КЗ, коефіцієнт надлишку окиснювача. Результатами розрахунку «складної» ММ КЗ ГТД є: мольний склад ПЗ етанолу у повітрі, T_{Γ}^* , μ , R , c_p , k .

У табл. 4 подано результати розрахунку мольного складу ПЗ для трьох характерних режимів польоту «зниження на посадку», «режиму зльоту», «крейсерський максимальний».

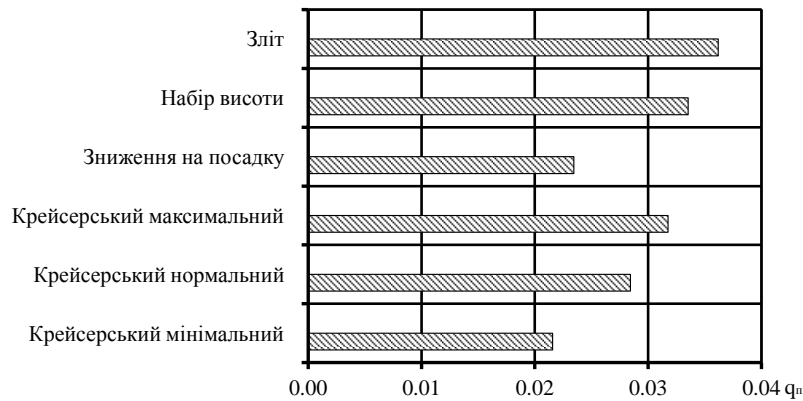


Рис. 1. Результати розрахунку відносної витрати пального, розробленою математичною моделлю для основних режимів роботи ГТД CF6-80А

Таблиця 4
Мольний склад продуктів згоряння етанолу у повітрі, отриманий шляхом розв'язання системи рівнянь хімічної термодинаміки

№	Речовина	Режим польоту		
		Зниження на посадку	Зліт	Крейсерський максимальний
1	O ₂	1,7236E-01	1,4419E-01	1,5396E-01
2	O	0,0000E+00	9,8344E-08	1,3889E-08
3	H ₂	0,0000E+00	2,5797E-08	3,1873E-09
4	H	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
5	OH	1,0487E-07	1,3771E-05	3,4713E-06
6	H ₂ O	5,6181E-02	8,0224E-02	7,1968E-02
7	H ₂ O ₂	3,3431E-10	2,0668E-08	4,3317E-09
8	CO ₂	3,2100E-02	4,8223E-02	4,2684E-02
9	CO	0,0000E+00	3,5268E-08	3,1711E-09
10	N ₂	7,1485E-01	7,0264E-01	7,0692E-01
11	N	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
12	NO	4,3207E-05	6,4246E-04	2,7620E-05
13	NO ₂	5,1129E-06	1,9005E-05	9,3365E-06
14	N ₂ O	1,0525E-08	1,9763E-07	5,7819E-08
15	HNO ₂	4,5880E-08	3,8163E-07	1,2430E-07
16	HNO ₃	6,9255E-10	1,6370E-09	5,8237E-10
17	Ar	2,4453E-02	2,4046E-02	2,4186E-02
Сума		0,999999	0,999999	0,999759

6.4. Порівняння розроблених математичних моделей робочого процесу камери згоряння газотурбінного двигуна

Порівняння ММ розрахунку КЗ ГТД відбувалося по наступним інтегральним параметрам: T_r^* , μ , R , c_p , k . У «спрощеній» ММ T_r^* є параметром вихідних даних, а λ розрахунковим. У «складній» ММ КЗ ГТД навпаки, T_r^* є розрахунковим параметром,

а λ задається на основі результатів розрахунку «спрощеною» ММ.

Порівняння з результатами «спрощеної» ММ представлено в табл. 5.

Таблиця 5
Порівняння результатів розрахунку, отриманих розробленими ММ робочого процесу КЗ ГТД

Режим	№	Параметр	«Спрощена» ММ	«Складна» ММ	Похибка, %
Зниження на посадку	1	T_r^* , К	1036	1044,5	0,82
	2	μ , кг/кмоль	28,627	28,944	1,10
	3	R , Дж/(кг·К)	290,44	287,27	-1,09
	4	k	1,3202	1,3206	0,03
	5	c_p , кДж/(кг·К)	1,1974	1,183	-1,18
Режим зльоту	1	T_r^* , К	1434	1422,5	-0,80
	2	μ , кг/кмоль	28,542	28,846	1,07
	3	R , Дж/(кг·К)	291,31	288,24	-1,05
	4	k	1,2922	1,2907	-0,12
	5	c_p , кДж/(кг·К)	1,2883	1,2799	-0,65
Крейсерський максимальний	1	T_r^* , К	1289	1277,2	-0,92
	2	μ , кг/кмоль	28,571	28,880	1,08
	3	R , Дж/(кг·К)	291,01	287,91	-1,06
	4	k	1,3011	1,3011	0,00
	5	c_p , кДж/(кг·К)	1,2575	1,2441	-1,06

З табл.5 видно, що «спрощена» ММ робочого процесу КЗ ГТД, яка неявно враховує термічну дисоціацію ПЗ та коректно складений еквівалентний шлях хімічної реакції процесу горіння показує добрий збіг з більш точним розрахунком, що спирається на розв'язання системи рівнянь хімічної термодинаміки.

6. Висновки

1. Отримано ММ робочого процесу КЗ ГТД, яка працює на етанолі та неявно враховує термічну дисоціацію ПЗ та коректно складений еквівалентний шлях хімічної реакції процесу горіння. Особливістю

алгоритму є неявне врахування цих процесів за рахунок використання експериментальних значень питомих ізобарних теплоємностей ПЗ як функції температури і тиску.

2. Розроблена ММ робочого процесу КЗ ГТД, яка працює на етанолі і базується на вирішенні системи вісімнадцяти рівнянь хімічної термодинаміки.

3. За допомогою «спрощеної» ММ робочого процесу КЗ ГТД одержані значення $\mu_{\text{ПЗ}}$, R , c_p , $c_{\text{раа}}$, k , $q_{\text{п}}$ для основних режимів роботи ГТД СФ6-80А, який працює на етанолі.

4. За допомогою «складної» ММ робочого процесу КЗ ГТД розрахунковим шляхом вирішенні системи рівнянь хімічної термодинаміки і одержано значення $T_{\text{г}}^*$, μ , R , c_p , k .

5. Порівняно «спрощену» ММ робочого процесу КЗ зі «складною» за наступними інтегральними параметрами: $T_{\text{г}}^*$, μ , R , c_p , k ПЗ етанолу. Отримано, що результати розрахунку цих параметрів відрізняються не більше 1,2%. Тому використання «складної» ММ робочого процесу КЗ при моделюванні характеристик ГТД не надає суттєвих переваг при визначенні інтегральних параметрів КЗ ($q_{\text{п}}$, $T_{\text{г}}^*$, c_p). Крім того, при відхиленні робочого діапазону тисків за межі використання моделі ідеального газу, «складна» ММ може мати гірший збіг результатів розрахунку з експериментом.

Перспективним напрямом досліджень є подальше вдосконалення алгоритму визначення відносної витрати палива для КЗ ГТД, що використовує в якості палива суміші етану та гасу.

Внесок авторів

Формулювання проблеми, розробка математичних моделей робочого процесу камери згоряння ГТД, проведення розрахунків «складною» математичною моделлю, формулювання висновків, написання рукопису роботи – **М. А. Шевченко і М. В. Амброжевич**; аналіз літературних джерел та проведення розрахунків «спрощеною» математичною моделлю – **О. Г. Селезень**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Електростанції газотурбінні [Електронний ресурс] // АТ «МОТОР СІЧ». – Режим доступу <https://motorsich.com/ukr/products/land/vrazrabortke/elektorstancii/> – (дата звернення: 15.08.2024) – Назва з екрана.
2. Шелестюк, А. И. Широкое внедрение ГТУ НПКГ «Зоря»-«Машипроект» – наиболее эффективный путь модернизации теплоэнергетики Украины [Текст] / А. И. Шелестюк // Наукові праці. Серія «Техногенна безпека». – Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили. – 2004. – Випуск 18. – С. 130–134.
3. Дубов, В. А. Применение альтернативных видов топлива, полученных из возобновляемых источников энергии, в когенерационных установках [Текст] / В. А. Дубов // Наукові праці. Серія «Техногенна безпека». – Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили. – 2010. – Т. 137, Вип. 124. – С. 125–126. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchdutb_2010_137_124_22. (дата звернення: 15.08.2024) – Назва з екрана.
4. Скорук, Е. Л. Виробництво та перспективи використання біопалива у Вінницькій області [Текст] / Е. Л. Скорук // Облік і фінанси. – 2017. – №2 (76). – С. 153–162. – Режим доступу: <http://repository.vsuai.org/getfile.php/16604.pdf>. (дата звернення: 15.08.2024) – Назва з екрана.
5. Біоетанол – практика та застосування [Електронний ресурс] // ПрАТ «Українська технологічна компанія». – Режим доступу https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/bioethanol_UTC_experience-1.pdf – (дата звернення: 15.08.2024) – Назва з екрана.
6. Local Green Power Supply Plants Based on Alcohol Regenerative Gas Turbines: Economic and Environmental Aspects [Text] / O. Cherednichenko, & et al. // Energies. – 2020. – Vol. 13, iss. 9. – Article No. 2156. DOI: 10.3390/en13092156.
7. A comparative study of pentanol (C5 alcohol) and kerosene blends in terms of gas turbine engine performance and exhaust gas emission [Text] / T. Suchocki, & et al. // Fuel. – 2023. – Vol. 334, Part 2. – Article No. 126741. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126741.
8. The Use of Ethanol as an Alternative Fuel for Small Turbojet Engines [Text] / R. Andoga, L. Fozo, M. Schrötter, & S. Szabo // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, iss. 5. – Article No. 2541. DOI: 10.3390/su13052541.
9. Kislov, O. Development of a method to improve the calculation accuracy of specific fuel consumption for performance modeling of air-breathing engines. [Text] / O. Kislov, M. Ambrozhevich, & M. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. –

2021. – Vol. 2, Iss. 8 (110). – P. 23–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229515.

10. Shevchenko, M. Working process model development of the gas turbine engine combustor fueling on methanol [Text] / M. Shevchenko, M. Ambrozhevich, & K. Fesenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 2, iss. 1 (128). – P. 49–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.301325.

11. Амброжевич, М. В. Аналитическое определение удельной изобарной теплоёмкости продуктов сгорания с учетом влияния давления и эффекта термической диссоциации. [Текст] / М. В. Амброжевич, & М. А. Шевченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 1/153. – С. 4-17. DOI: 10.32620/akt.2019.1.01.

12. Ambrozhevich, M. V. Equations of Average Isobaric Heat Capacity of Air and Combustion Gases with Influence of Pressure and Effect of Thermal Dissociation [Text] / M. V. Ambrozhevich, & M. A. Shevchenko // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 2/154. – С. 18-29. DOI: 10.32620/akt.2019.2.02.

13. Bonnie, J. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species [Text] / J. Bonnie, G. Sanford, & A. Martin // *NASA Report*. – 1993. – No. 4513. – 94 p. Available at <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940013151>. – (дата звернення: 15.08.2024) – Назва з екрана.

14. Buecker, D. Thermodynamic Property Models for Moist Air and Combustion Gases [Text] / D. Buecker, R. Span, & W. Wagner // *ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*. – 2003. – Vol. 125, No. 1. – P. 374-384. Available at <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/125/1/374/461821/Thermodynamic-Property-Models-for-Moist-Air-and?redirectedFrom=fulltext>. – (дата звернення: 15.08.2024) – Назва з екрана.

References

1. *Elektrostantsiyi hazoturbinni* [Gas turbine power plants]. JSC «MOTOR SICH» Available at <https://motor-sich.com/ukr/products/land/vrazrobotke/elektorstancii/> (accessed: 15.08.2024). (In Ukrainian).

2. Shelestyuk, A. I. Shirokoe vnedrenie GTU NPKG «Zorya»-«Mashproekt» – naibolee effektivnyi put' modernizatsii teploenergetiki Ukrainy [Widespread implementation of the Zorya-Mashproekt gas turbine plant is the most effective way to modernize the thermal power industry of Ukraine] *Naukovi pratsi. Seriya «Tekhnogenna bezpeka»*, 2004, vol. 18, pp. 130–134. (In Russian).

3. Dubov, V. A. Primenenie al'ternativnykh vidov topliva, poluchennykh iz vozobnovlyаемыkh istochnikov energii, v kogeneratsionnykh ustanovkakh [Application of alternative fuels obtained from renewable energy sources in cogeneration plants] *Naukovi pratsi. Seriya «Tekhnogenna bezpeka»*, 2010, vol. 137, no. 124, pp. 125-

126. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchdub_2010_137_124_22. (accessed: 15.08.2024). (In Russian).

4. Skoruk, O. P. Vyrobnystvo ta perspektyvy vykorys-tannya biopalyva u Vinnyts'kiy oblasti. [Production and Prospects of Using Biological Fuel in Vinnytsia Region] *Oblik i finansy – Accounting and Finance*, 2017, no. 2 (76), pp. 153-162. Available at: <http://repository.vsau.org/getfile.php/16604.pdf>. (accessed: 15.08.2024). (In Ukrainian).

5. *Bioetanol – praktika ta zastosuvannya* [Bioethanol – practice and application]. PJSC "Ukrainian technology company". Available at: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/bioethanol_UTC_experience-1.pdf (accessed 15.08.2024). (In Ukrainian).

6. Cherednichenko, O., Havrysh, V., Shebanin, V., Kalinichenko, A., Mentel, G., & Nakonieczny, J. Local Green Power Supply Plants Based on Alcohol Regenerative Gas Turbines: Economic and Environmental Aspects. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 9, article no. 2156. DOI: 10.3390/en13092156.

7. Suchocki, A., Kazimierski, P., Lampart, K., Januszewicz, T., Bialecki, B., Gawron, A., & Janicka, A. A comparative study of pentanol (C5 alcohol) and kerosene blends in terms of gas turbine engine performance and exhaust gas emission. *Fuel*, 2023, vol. 334, part 2, article no. 126741. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126741.

8. Andoga, R., Fozo, L., Schrötter, M., & Szabo, S. The Use of Ethanol as an Alternative Fuel for Small Turbojet Engines. *Sustainability*, 2021, vol. 13, article no. 2541. DOI: 10.3390/su13052541.

9. Kislov, O., Ambrozhevich, M. & Shevchenko, M. Development of a method to improve the calculation accuracy of specific fuel consumption for performance modeling of air-breathing engines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, vol. 2, iss. 8 (110), pp. 23–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229515.

10. Shevchenko, M., Ambrozhevich, M., & Fesenko K. Working process model development of the gas turbine engine combustor fueling on methanol. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, vol. 2, iss. 1 (128), pp. 49–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.301325.

11. Ambrozhevich, M. V., & Shevchenko, M. A. Analiticheskoe opredelenie udel'noi izobarnoi teploemkosti produktov sgoraniya s uchedom vliyaniya davleniya i efekta termicheskoi dissotsiatsii [Analytical Determination of Isobaric Heat Capacity of Air and Combustion Gases with Influence of Pressure and Effect of Thermal Dissociation]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 1/158, pp. 4-17. DOI: 10.32620/akt.2019.1.01. (In Russian).

12. Ambrozhevich, M. V., & Shevchenko, M. A. Equations of Average Isobaric Heat Capacity of Air and Combustion Gases with Influence of Pressure and Effect of Thermal Dissociation. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 2/154, pp. 18-29. DOI: 10.32620/akt.2019.2.02.

13. Bonnie, J., Sanford, G., & Martin, A. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species. *NASA Report*, 1993, no. 4513. 94 p. Available at <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940013151>. (accessed: 15.08.2024).

14. Buecker, D., Span, R., & Wagner, W. Thermodynamic Property Models for Moist Air and Combustion

Gases. *ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2003, vol. 125, no. 1, pp. 374-384. Available at <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinepower/article-abstract/125/1/374/461821/Thermodynamic-Property-Models-for-Moist-Air-and?redirectedFrom=fulltext>. (accessed: 15.08.2024).

Received 17.07.2023, Accepted 15.10.2024

MATHEMATICAL MODEL OF THE GAS TURBINE ENGINE COMBUSTOR FUELING ON ETHANOL

Mykhailo Shevchenko, Maya Ambrozhevich, Oleh Selezen

Ethanol is one of the most promising alternative fuels for Ukraine. To convert existing projects of power and cogeneration plants based on gas turbine engines (GTEs) operating on petroleum products and natural gas to ethanol, as well as for their design and performance calculation, it is necessary to have a mathematical model of the working process of GTE combustor. **The object of the study** is the working process of the GTE combustor fueling on ethanol. **The subject of the study** is a mathematical model of the working process of GTE combustor fueling on ethanol. **The work aims** to improve a mathematical model of the working process of a GTE combustor fueling on ethanol by changing the algorithm for calculation of the fuel air ratio, considering thermal dissociation, and a correctly formulated equivalent chemical reaction path of the combustion process. To achieve the aim, the following **tasks** were solved: based on the use of experimental values of specific isobaric heat capacities of combustion products, which are a function of temperature and pressure, a mathematical model of the working process of the GTE combustor was improved ("simplified" mathematical model); based on the solution of the system of equations of chemical thermodynamics, a mathematical model of the working process of the GTE combustor was developed ("complex" mathematical model); the results of calculation by "simplified" mathematical model of the working process of the GTE combustor were compared with the "complex" one. The following **results** were obtained: the difference in the calculation of the combustion products' thermodynamic parameters between the developed mathematical models was less than 1.2% for the three modes of the General Electric CF6-80A engine. **Conclusion:** the "simplified" mathematical model of the working process of the GTE combustor fueling on ethanol was improved. A feature of the model is the implicit consideration of the effect of thermal dissociation and correctly formulated equivalent chemical reaction path of the combustion process by using experimental values of specific isobaric heat capacities of combustion products. This will improve the accuracy of fuel air ratio calculation and other thermodynamic parameters of GTE combustor mathematical models fueling on ethanol, without significantly complicating the model algorithm.

Keywords: fuel air ratio; combustor; ethanol; isobaric heat capacity (specific heat at constant pressure); enthalpy; combustion products; mathematical model of the combustor.

Шевченко Михайло Анатолійович – PhD, доц. каф. теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Амброжевич Майя Володимирівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. аерокосмічної теплотехніки, Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Селезень Олег Георгійович – студ. каф. теорії авіаційних двигунів, Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Mykhailo Shevchenko – PhD, Associate Professor at the Department of Aircraft Engines Theory, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: mikleshevchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0806-6632, Scopus ID: 59179934100.

Maya Ambrozhevich – Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Department of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: ambrozhevichmaya@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0856-8234, Scopus ID: 57222070005.

Oleh Selezen – Student at the Department of Aircraft Engines Theory, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: selezen.oleh@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2805-7503.