

Технічні науки

УДК 621.438+621.165

Любчик Геннадій Миколайович

доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Любчик Геннадий Николаевич

доктор технических наук, профессор

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Liubchik Gennadii

Doctor of Technical Sciences, Professor

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Фіалко Наталія Михайлівна

доктор технічних наук, професор,

член-кореспондент НАН України, завідувач відділом

Інститут технічної теплофізики НАН України

Фиалко Наталия Михайловна

доктор технических наук, профессор,

член-корреспондент НАН Украины, заведующая отделом

Институт технической теплофизики НАН Украины

Fialko Nataliia

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Corresponding Member of NAS of Ukraine, Head of the Department

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Реграгі Абубакр

молодший науковий співробітник

Институт технічної теплофізики НАН України

Regragui Aboubakr

младший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Regragui Aboubakr

Junior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Шеренковський Юлій Владиславович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

провідний науковий співробітник

Институт технічної теплофізики НАН України

Шеренковский Юлий Владиславович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

ведущий научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Sherenkovskii Iulii

Candidate of Technical Sciences (PhD),

Senior Scientific Researcher, Leading Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Меранова Наталія Олегівна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

провідний науковий співробітник

Институт технічної теплофізики НАН України

Меранова Наталия Олеговна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

ведущий научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Meranova Nataliia

*Candidate of Technical Sciences (PhD),
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Полозенко Ніна Петрівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Полозенко Нина Петровна

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Polozenko Nina

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Scientific Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Малецька Ольга Євгенівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Малецкая Ольга Евгеньевна

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Maletska Olha

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Scientific Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Кутняк Ольга Миколаївна

*науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Кутняк Ольга Николаевна

*научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Kytniak Olga

Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

**ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ І КОМБІНОВАНИХ НА ЇХ
ОСНОВІ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

**ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ
НА ИХ ОСНОВЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

**FEATURES OF THE METHODOLOGY OF THERMODYNAMIC
MODELING OF GAS TURBINE AND COMBINED ON THEIR BASIS
POWER PLANTS**

***Анотація.** У статті представлено ентальпійно-ентропійна методику термодинамічного аналізу газотурбінних і комбінованих на їх основі енергоустановок, наведено результати тестування методики на реальному технічному об'єкті, які доводять її високу ефективність.*

***Ключові слова:** газотурбінні енергоустановки, монарні газопарові установки, термодинамічне моделювання, ентальпійно-ентропійна методика.*

***Аннотация.** В статье представлена энтальпийно-энтропийная методика термодинамического анализа газотурбинных и комбинированных на их основе энергоустановок, приведены результаты тестирования методики на реальном техническом объекте, доказывающие ее высокую эффективность.*

***Ключевые слова:** газотурбинные энергоустановки, монарные газопаровые установки, термодинамическое моделирование, энтальпийно-энтропийная методика.*

Summary. The article presents the enthalpy-entropy methodology of thermodynamic analysis of gas turbine and combined power plants on their basis, the results of testing the method on a real technical facility, proving its high efficiency.

Key words: gas turbine power plants, monar gas-steam plants, thermodynamic modeling, enthalpy-entropy methodology.

Актуальність теми дослідження. Застосування когенераційних технологій на базі газотурбінних і комбінованих на їх основі енергоустановок є одним з важливих напрямів розвитку світової енергетики [1; 2; 3]. Ефективне використання таких установок, зокрема монарних газопарових установок, передбачає глибоке дослідження їх робочих процесів [4; 5; 6]. Для цього потрібні відповідні сучасні методики термодинамічного аналізу. Питання розробки таких методик, їх удосконалення і тестування – актуальні теми сучасного моделювання в енергетиці.

Виклад основного матеріалу. В роботі представлена ентальпійно-ентропійна методика термодинамічного аналізу газотурбінних і комбінованих на їх основі енергоустановок. Слід відмітити, що використання традиційної методики термодинамічного моделювання на основі T - S діаграм при виробництві гарячої води чи пари на комбінованих установках має свої складності. Проте застосовування h - S діаграми в такому випадку дає можливість зіставити цикл ГТУ з суміщеними з ним процесами в теплофікаційних схемах.

Особливості розробленої ентальпійно-ентропійної методики дозволяють реалізувати послідовний (безітераційний) алгоритм розрахункової діагностики термодинамічних параметрів циклу ГТУ, включаючи блоки розрахунку компресора, камери згоряння та вихлопного патрубку і спростити процедури оцінки термодинамічних параметрів компонент робочого тіла у вузлових точках циклу. Спрощення здійснюється на основі побудови і використання відповідних рівнянь

регресії, одержаних за результатами статистичної обробки наявних у літературі табличних даних для двох діапазонів зміни визначальних параметрів (зони I і II). Такий підхід дозволяє також досягти низьку похибку розрахунку шуканих величин.

Перевагами пропонованої методики у порівнянні з традиційно застосовуваною є такі:

- універсальність щодо можливості використання єдиної форми аналізу енергетичних характеристик ГТУ і комбінованих на їх основі енергоустановок;
- вища точність визначення основних енергетичних характеристик установок (питомих робіт їх елементів, ККД установки тощо) через використання у традиційній методиці ряду спрощуючих передумов, таких як сталість теплоємності робочих тіл та ін.
- більш висока ефективність обчислювального алгоритму і відповідного програмного продукту.

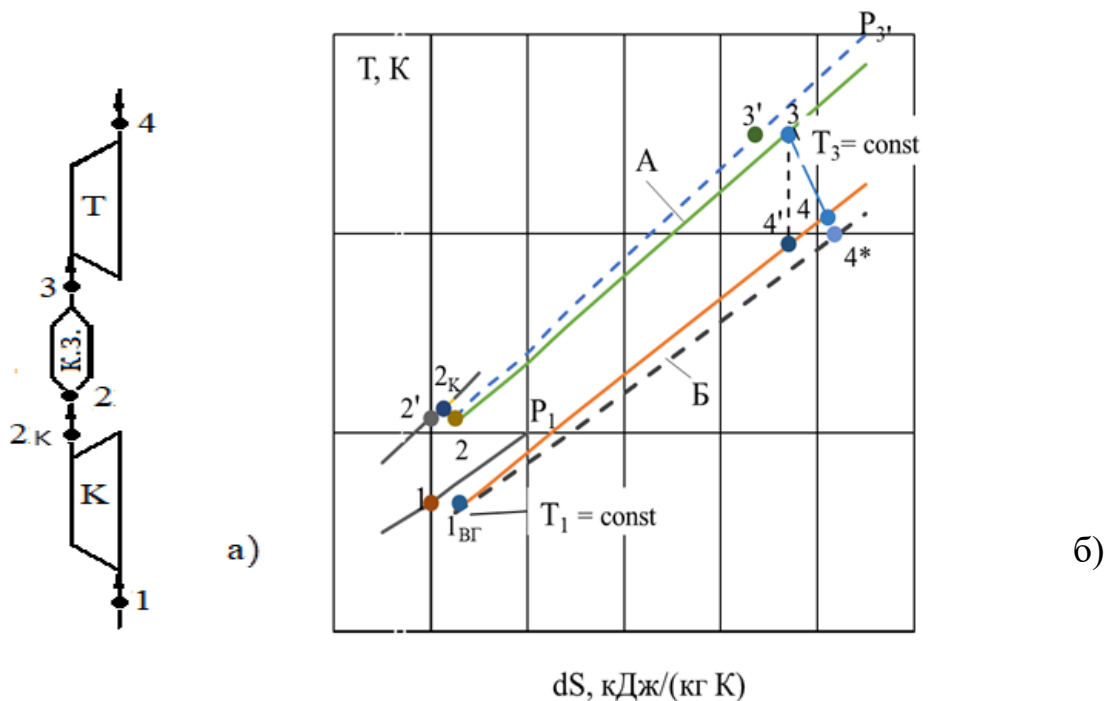


Рис. 1. Структурна схема (а) і конфігурація циклу (б) газотурбінного двигуна (цикл Брайтона):

1 - атмосферне повітря перед компресором; 2к - компресорне повітря перед камерою згоряння; 2 - суміш компресорного повітря і палива; 3' і 3 - продукти згоряння перед

турбіною при ізобарному і політропному процесі підведення теплоти в камеру згоряння; 4' і 4 - стан робочого тіла в кінці адіабатного і політропного процесів розширення за турбіною з урахуванням втрат тиску в трактах ГТУ; 4* і 1_{ВГ} - стан газів при ізобарному процесі вихлопу. Зони циклу А і Б на рис. 1, б відображають області втрат працездатності ГТУ в результаті зниження тиску в камері згоряння та аеродинамічного опору у вихлопному патрубку ГТУ

Остання перевага зумовлена, по-перше, відсутністю ітераційної процедури визначення термодинамічних параметрів, характерної для традиційної методики, по-друге, спрощенням визначення термодинамічних характеристик компонент робочого тіла у вузлових точках циклу на основі побудови відповідних рівнянь регресії для термодинамічних властивостей даних компонент.

Алгоритм пропонованої методики ілюструється на прикладі ГТУ простої схеми рис. 1.

При термодинамічному моделюванні окрім одержаних рівнянь регресії використовуються рівняння для визначення ентропії повітря і палива, а також рівняння енергетичних балансів. Рівняння питомої ентропії повітря в кінці адіабатного процесу стиснення $S_{2'}$ та питомої ентропії повітря $S_{4'(ПОВ)}$ і палива $S_{4'(П)}$ в кінці адіабатного процесу розширення мають вигляд

$$S_{2'} = S_1 + R_{II} \cdot \ln \pi_{\kappa}, \quad (1)$$

$$S_{4'(ПОВ)} = S_{3(ПОВ)} - R_{ПОВ} \cdot \ln \pi_T, \quad (2)$$

$$S_{4'(П)} = S_{3(П)} - R_{II} \cdot \ln \pi_T, \quad (3)$$

В розрахунках використовуються наступні балансові рівняння

- рівняння коефіцієнта надлишку повітря в камері згоряння

$$\alpha = L_0^{-1} \cdot \left[\frac{Q_H - (h_{3'(II)} - h_{1(II)})}{h_{3'(ПОВ)} - h_{2(ПОВ)}} \right] \quad (4)$$

- рівняння питомої ентальпії суміші компресорного повітря і палива на вході до камери згоряння

$$h_2 = h_{2K} + d_T \cdot h_{1T} \quad (5)$$

та у вузлових точках (3) (4'), (4), (4*) і (1_{вих})

$$h_i = h_{iK} + d_T \cdot h_{iT}, \quad (6)$$

- о рівняння осередненої температури суміші компонент у вузловій точці 2

$$T_2 = h_2 / (h_{2K} / T_{2K} + d_T \cdot h_{1T} / T_{1T}) \quad (7)$$

та у вузлових точках (4'), (4), (4*)

$$T_i = h_i / (h_{i(B)} / T_{i(B)} + d_T \cdot h_{iT} / T_{iT}), \quad (8)$$

Згідно з розробленою методикою за розрахунковими значеннями питомих ентальпій у вузлових точках цикла визначаються техніко-економічні характеристики установки, в тому числі:

- питома теоретична l_{K0} та реальна l_K робота компресора

$$l_{K0} = (h_2 - h_1), \quad (9) \quad l_K = l_{K0} / \eta_K; \quad (10)$$

- питома теоретична l_{T0} і реальна l_T робота турбіни

$$l_{T0} = h_3 - h_4, \quad (11) \quad l_T = \eta_T \cdot l_{T0}; \quad (12)$$

- питома підведена в камері згоряння теплота q_1 , питома внутрішня робота турбіни l_B і її внутрішній ККД η_B

$$q_1 = h_3 - h_2, \quad (13) \quad l_B = h_T - h_K, \quad (14) \quad \eta_B = l_B / q_1. \quad (15)$$

З метою перевірки роботи запропонованої ентальпійно-ентропійної методики було проведено її тестування на реальному технічному об'єкті. Як об'єкт тестування був прийнятий газотурбінний двигун ДН-70 виробництва ДП НВК «Зоря»-«Машпроект». Даний двигун в автономному режимі роботи за простою схемою має номінальну потужність 10500 кВт, електричний ККД $\eta_{ел} = 36\%$ при початковій температурі циклу $T_3 = 1473$ К ($t_3 = 1200$ °С) і ступені підвищення тиску компресорного повітря $\pi_K = 19,5$ в базовому режимі роботи.

В таблиці 1 представлені характерні результати розрахунків з використанням запропонованої ентальпійно-ентропійної методики.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники двигуна ДН-70 в автономному режимі його роботи, розраховані за пропонованою методикою

Параметр	Позначення	Величина
Питома робота компресора, кДж/кг	l_K	447,0365
Коефіцієнт надлишку повітря в камері згоряння	α	3,0713
Питома підведена теплота в камері згоряння, кДж/кг	q_1	957,6371
Питома робота газової турбіни, кДж/кг	l_T	809,8853
Питома внутрішня робота ГТУ, кДж/кг	l_B	362,8488
Внутрішній ККД ГТУ	η_B	0,3789

З використанням одержаного значення внутрішнього ККД двигуна ДН-70 отримано величину його електричного ККД із співвідношення

$$\eta_{ел} = \eta_B \times \eta_M \times \eta_T \times \eta_{к.з} \times \eta_{тп}, \quad (16)$$

яка дорівнює 35,5% (при $\eta_M = 0,97$; $\eta_T = 0,99$; $\eta_{к.з.} = 0,995$; $\eta_{тп} = 0,98$). За даними ДП НВК «Зоря»-«Машпроект» електричний ККД цього двигуна становить 36%. Тобто небаланс ККД, що зіставляються, дорівнює 1,39%

$$(\delta_\eta = \Delta_\eta / \eta_{ел} \cdot 100\%, \text{ де } \Delta_\eta = (\eta_{ел} - \eta_{ел(ауд)})).$$

Відповідні зіставлення виконані також при проведенні енергетичного аудиту ГТД MW701FG фірми Mitsubishi. (Параметри цикла двигуна: $t_3 = 1410^\circ\text{C}$, $\tau = T_1/T_3 \approx 0,17$ і $\pi_k = 21$). За результатами аудиту електричний ККД установки склав 38,8% при ККД за даними фірми 39,5%. Тобто небаланс порівнюваних ККД становить 1,77%.

Висновки. Виконані дослідження особливостей методики термодинамічного моделювання газотурбінних і комбінованих на їх основі

енергоустановок та проведеній аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок про високу ефективність пропонованої методики.

Література

1. Любчик Г.Н., Дикий Н.А., Фиалко Н.М., Реграги А. Предельные возможности термодинамического форсирования монарной газопаровой технологии. *Промышленная теплотехника*. 2011. 33. № 6. С. 46-51.
2. Любчик Г.Н., Фиалко Н.М., Реграги А., Навродская Р.А., Шеренковський Ю.В. Підвищення ефективності монарних газопарових установок на основі використання двопаливних схем. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2021. №02(102). С. 69-72
3. Любчик Г.Н., Фиалко Н.М., Реграги А. Повышение энергетической и экологической эффективности монарных газопаровых установок при частичном замещении газотурбинных топлив. Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: матеріали ХХІ міжнародної науково-практичної конференції (г. Ялта, 7-11 июня 2011г.). Институт промышленной экологии. Киев: «ИПЦ АЛКОН». 2011. С. 137-138.
4. Lyubchik G., Fialko N., Regragui A., Navrodska R., Meranova N. Thermodynamic analysis of monar gas-steam plants with use fuel substitutes of natural gas. III International Scientific and Practical Conference «Achievements and Prospects of Modern Scientific Research». 7-9 February, 2021, Buenos Aires, Argentina. P. 78-81.
5. Любчик Г.Н., Фиалко Н.М., Реграги А., Майсон Н.В., Швецова Л.А., Ольховская Н.Н. Исследование термодинамических и технико-экономических параметров двухтопливной монарной газопаровой установки. *Проблемы промышленной теплотехники*: материалы VIII

международной конференции (Киев, 8-11 октября 2013г.). Киев. 2013. (Электронне видання).

6. Любчик Г.Н., Фиалко Н.М., Реграги А., Навродская Р.А., Кутняк О.Н., Швецова Л.О. Термодинамический анализ энергетической эффективности двухтопливных газопаровых установок. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2015. Т3. №8(75). С. 21-26.