

10.31653/smf50.2025.155-159

Черемісін В.І., Сапіга В.В., Ігнатенко О.А.

Інститут Військово-Морських Сил
Національного Університету «Одеська Морська Академія»**ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ МОРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Вступ. Основним недоліком газотурбінних двигунів, які працюють за простим відкритим термодинамічним циклом є недостатньо високий коефіцієнт корисної дії у порівнянні з дизельними двигунами (наприклад, коефіцієнт корисної дії двигуна UGT25000 та LM2500, відповідно дорівнює 37,0 % та 41,3 %) та обмеження температури газоповітряного потоку на виході з камери згоряння. Фактор, обмеження температури газоповітряного потоку на виході з камери згоряння, обмежує можливість підвищення термічного коефіцієнта корисної дії газотурбінного двигуна [1-5]. Враховуючи одну із основних переваг газотурбінних двигунів у порівнянні з дизельним двигуном достатньо висока потужність що заключена у мінімальних масо-габаритних показниках, робить доцільним наукові дослідження щодо удосконалення існуючого термодинамічного циклу (цикл Брайтона).

Мета статті є дослідження основних показників удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінних двигунів в якому передбачається розширення відпрацьованих газів із силової турбіни до тиску нижче атмосферного з одночасним процесом охолодження перед випуском їх в атмосферу, що в підсумку підвищує питому потужність двигуна.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо спосіб здійснення термодинамічного циклу газотурбінного двигуна, за яким гази розширюються в силовій газовій турбіні до тиску нижче атмосферного. Ця умова забезпечується та підтримується завдяки наявності в удосконаленій конструкції газотурбінного двигуна ресиверу-охолоджувача та пристрою, якій забезпечує створення тиску в ресивері нижче атмосферного (умовний, вакуумний насос). Охолоджуючої рідиною в даному циклі може бути хладагент утилізаційної абсорбційної холодильної установки, що в підсумку дозволить збільшити енергоефективність установки в цілому.

На рис. 1 представлений в координатах p - v та T - s термодинамічний цикл газотурбінного двигуна простого і відкритого типу, який враховує процес розширення газової суміші в силовій турбіні до тиску нижче атмосферного.

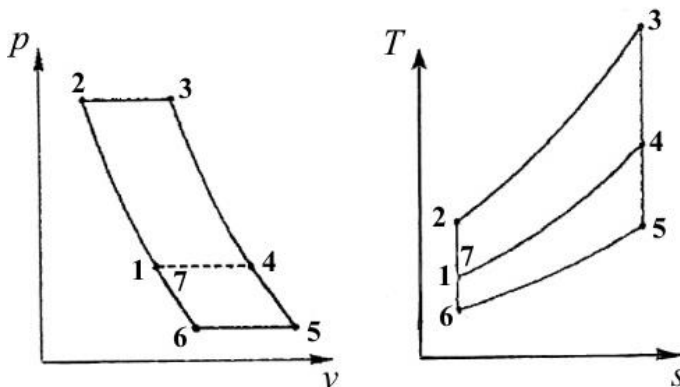


Рис. 1. Термодинамічний цикл газотурбінного двигуна з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного

Принципова схема газотурбінного двигуна, працюючого за удосконаленим термодинамічним циклом представлена на рис. 2.

Удосконалений термодинамічний цикл газотурбінного двигуна (мова в даній статті йде про ідеальний термодинамічний цикл) здійснюється наступним чином, а саме, повітря всмоктується компресором 1 із навколишнього середовища та ізоентропно стискується до тиску p_2 (процес 1-2, рис. 1) та надходить на вхід у камеру згоряння 2, де відбувається процес підведення тепла (процес 2-3, рис. 1). Газоповітряна суміш, яка володіє запасом потенційної енергії, в наслідок безперервного процесу підведення тепла надходить в газову турбіну 3, де ізоентропно розширюється до тиску нижче атмосферного (процес 3-5, рис. 1), якій утворюють в ресивері-охолоджувачі 5 за допомогою вакуумного насосу 6 (рис. 2). При цьому тепло від відпрацьованих газів відбирається холодагентом утилізаційної абсорбційної холодильної установки (процес 5-6, рис. 1) і далі їх тиск підвищується вакуумним насосом до атмосферного (процес 6-7, рис. 1).

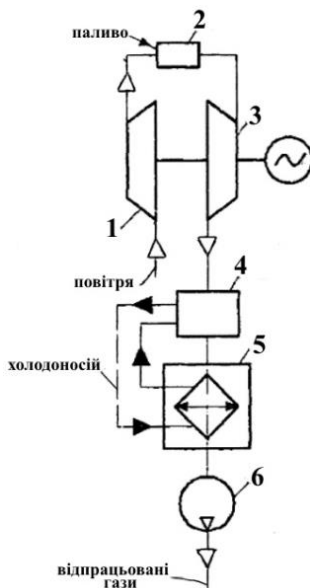


Рис. 2. Принципова схема газотурбінного двигуна з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного: 1 – компресор; 2 – камера згоряння; 3 – турбіна; 4 – утилізаційна абсорбційна холодильна установка; 5 – ресивер-охолоджувач відпрацьованих газів турбіни; 6 – вакуумний насос

Для ілюстрації ефективності розглянутого вище удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінного двигуна побудованого за простим і відкритим циклом проведені розрахунки за умови: фіксованої температури газів перед газовою турбіною t_3 (температура обмежується жароміцністю матеріалу соплових та робочих лопаток газової турбіни) та прийнятого ступеня підвищення тиску π_K . Отже, в розрахунках прийнято $t_3 = 850^\circ\text{C}$ і $\pi_K = 7$.

Розрахунки виконані, як для типового циклу (при розширенні газів в турбіні до атмосферного тиску – перший рядок нижченаведеної таблиці), так і для удосконалених термодинамічних циклів газотурбінного двигуна в інтервалі зміни значень тиску в ресивері-охолоджувачі з 0,09 МПа до 0,01 МПа (див. табл. 1). Температура газів в точці 6 визначалась за умови, що значення ентропії в точці 6 дорівнює її значенню в точках 1 і 2 (див. рис. 1).

Таблиця 1. Основні показники ефективності (питома робота, термічний коефіцієнт корисної дії) типового та удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінного двигуна

Тиск газів в точці 5, МПа	Температура газів в точках 5 і 6		Робота і її підвищення в удосконаленій схемі газотурбінного двигуна		Термічний коефіцієнт корисної дії і його підвищення	
	$t_5, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{ГТУ}},$ кДж/кг	$\delta l_{\text{ГТУ}},$ %	$\eta, \%$	$\delta\eta, \%$
0,1013	–	30,0	252,1	–	42,65	–
0,09	349,4	20,2	266,0	4,286	44,55	4,478
0,08	328,85	10,54	277,6	8,071	46,4	8,779
0,07	306,3	0	289,1	11,88	48,40	13,48
0,06	281,4	-11,9	302,0	15,75	50,6	18,70
0,05	253,2	-25,1	317,3	19,73	53,0	24,57
0,04	220,0	-40,4	335,3	23,87	56,2	31,36
0,03	181,8	-58,8	355,2	28,31	59,5	39,50
0,02	132,0	-82,0	381,7	33,28	63,9	49,89
0,01	59,26	-117,5	420,36	39,43	70,4	65,08

Проведений аналіз отриманих показників ефективності (корисна питома робота, термічний коефіцієнт корисної дії) удосконаленого термодинамічного циклу газотурбінного двигуна дозволяє зробити наступні висновки:

– зниження тиску процесу розширення газів в газовій турбіні нижче атмосферного дає позитивний ефект, а саме, призводить до достатнього підвищення корисної питомої роботи і термічного коефіцієнта корисної дії удосконаленої схеми газотурбінного двигуна в порівнянні з типовим термодинамічним циклом газотурбінного двигуна виконаного за простим і відкритим циклом, в якому газу розширюються до атмосферного тиску;

– при значеннях тиску процесу розширення газів в газовій турбіні нижче атмосферного тиску газів в межах від 0,04 МПа і вище для їх охолодження є сенс використовувати утилізаційну абсорбційну холодильну установку, яка в підсумку може дати підвищення значення енергоефективності установки в цілому;

– при значеннях тиску процесу розширення газів в газовій турбіні нижче атмосферного тиску газів в межах менше 0,04 МПа, для під-

вищення енергоефективності циклу установки є потреба розглянути сумісний цикл газотурбінного двигуна та холодильної установки каскадного типу, нижня ступінь якої потребує затрати зовнішньої додаткової роботи, що в свою чергу уповільнить зростання питомої роботи і термічного коефіцієнта корисної дії удосконаленої конструкції газотурбінного двигуна.

Висновок. Напрямами удосконалення існуючих газотурбінних двигунів є: підвищення температури перед газовою турбіною, що в свою чергу обмежено жароміцністю матеріалів елементів камери згоряння та соплових і робочих лопаток турбіни; робота газотурбінного двигуна за складним термодинамічним циклом (регенерація тепла, проміжне охолодження повітря у випадку двокаскадного компресору тощо); робота газотурбінного двигуна за бінарними циклами; запропонований удосконалений термодинамічний цикл газотурбінного двигуна з розширенням відпрацьованих газів нижче атмосферного та одночасним відведенням тепла в циклі утилізаційної абсорбційної холодильної установки. Представлені розрахунки в статті дозволяють зробити висновок, що процес охолодження газів в циклі не дивлячись на деякі конструктивні ускладнення газотурбінного двигуна є економічно доцільним з урахуванням достатнього підвищення основних показників циклу (питомої роботи та термодинамічного коефіцієнта корисної дії).

Перелік використаних джерел

1. Вассерман О.А., Слинько О.Г. Технічна термодинаміка і теплообмін: підручник. Одеса: Фенікс, 2019. 496 с.
2. Марченко А.П. Термодинамічна оцінка резервів підвищення ККД двигунів внутрішнього згоряння // Двигунів внутрішнього згоряння. 2004. Вип. 2. С. 45 – 54
3. Вассерман О.А., Слинько О.Г. Підвищення ефективності та потужності двигунів внутрішнього згоряння. 1. Цикл ДВЗ з випуском відпрацьованих газів в атмосферу // Технічні гази. 2018. Т. 18. № 3. С. 34-37.
4. Черемісін В.І., Ігнатенко О.А. Урахування процесу дроселювання в циклі комбінованого суднового двигуна // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 49. С. 152-156.
5. Черемісін В.І., Ігнатенко О.А. Дизельна форсунка з керованим уприскуванням палива в циліндр // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. 2024. Вип. 48. С. 137-142.