

10.31653/smf49.2024.152-157

Черемісін В.І., Ігнатенко О.А.

Інститут Військово-Морських Сил
Національний Університет «Одеська Морська Академія»

УРАХУВАННЯ ПРОЦЕСУ ДРОСЕЛЮВАННЯ В ЦИКЛІ КОМБІНОВАНОГО СУДНОВОГО ДВИГУНА

Вступ. При розгляді циклу комбінованого двигуна, що складається з дизеля і газотурбінної установки, не враховувалося, що процес випуску газів, що відпрацювали у двигуні внутрішнього згоряння (ДВЗ) у випускний колектор є процесом дроселювання. Цей безповоротний процес замінювався двома оборотними процесами відведення і підведення теплоти. Тому в роботі аналізується такий цикл з включенням реально протікаючого процесу дроселювання.

Метою статті є облік процесу дроселювання при зображенні циклу комбінованого двигуна на робочій і тепловій діаграмах і перевірка впливу цього процесу на розрахунок термічного коефіцієнту корисної дії (ККД) циклу.

Виклад основного матеріалу. При побудові теоретичного циклу комбінованого двигуна на підставі відомих допущень замінюють розімкнені робочі процеси ДВЗ і газотурбонагнітача (ГТН) термодинамічними циклами (рис. 1). Вони побудовані для дуже поширеної ізобарної системи наддування коли газ, що відпрацювали в циліндрах ДВЗ, спрямовуються у випускний колектор великого об'єму, а звідти практично при постійному тиску - в газову турбіну. При цьому ГТУ використовується як для забезпечення наддування ДВЗ, так і для здійснення додаткової роботи.

При випуску в колектор газу розширюються без теплообміну, але при цьому не виконують роботу, тобто має місце необоротне адиабатне дроселювання. Цей процес зазвичай замінюють двома оборотними процесами: ізохорним відведенням теплоти від газу (**5-1**) після його розширення в циліндрах ДВЗ і ізобарним підведенням тієї ж кількості теплоти до газу (**1 - III**) перед його ізентропним розширенням в турбіні [1, 2].

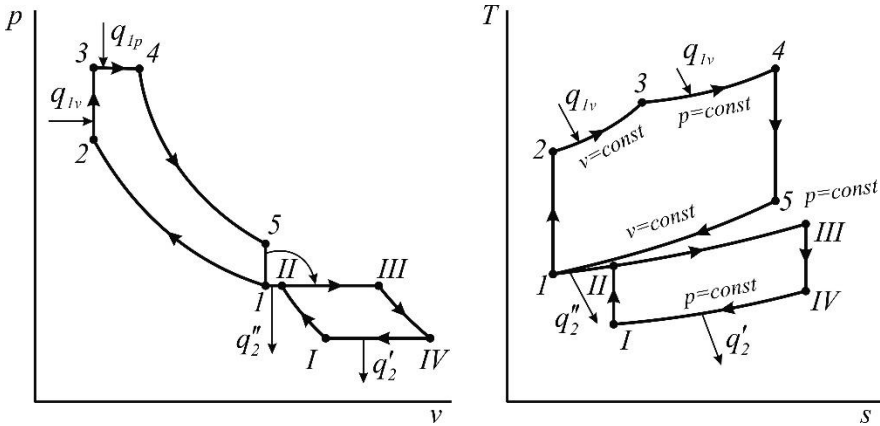


Рис. 1. Цикл комбінованого двигуна

Таким чином, даний цикл складається з циклів поршневого ДВЗ 1-2-3-4-5-1 і газотурбінної установки I - II - III - IV - I. Цикл ДВЗ включає ізоентропне стискування 1-2, ізохорний 2-3 і ізобарний 3-4 підвід теплоти до робочого тіла, ізоентропне розширення 4-5 і ізохорне відведення теплоти 5-1 від газу після його розширення. Цикл ГТН включає ізоентропне стискування повітря I - II в компресорі, ізобарний процес відведення теплоти II - I від цього повітря в охолоджувачі, ізобарний процес підведення теплоти I - III до газу перед турбіною, ізоентропне розширення газу III - IV в турбіні і ізобарний процес відведення теплоти IV - I від газу в доквіллія. Як зазначено вище, теплота відводиться також в процесі II - I від стислого компресором повітря перед його потраплянням в ДВЗ.

Формула для розрахунку термічного ККД комбінованого двигуна отримана в роботі [2] і має вигляд

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1 + k \cdot (\epsilon_k^{k-1} - 1) \cdot \left(\frac{T_I}{T_1} - \frac{T_{IV}}{T_1} \right)}{\epsilon_k^{k-1} \cdot [\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)]}, \quad (1)$$

де $\epsilon_k = \frac{v_I}{v_{II}}$ - ступінь стиску повітря в компресорі ;

λ - ступінь підвищення тиску;

ρ - ступінь попереднього розширення;

k - показник адіабати.

З виразу (1) за умови $\varepsilon_\kappa = 1$ виходить відома формула для термічного ККД циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти. У циклі дизеля з газотурбінним наддуванням, ГТН не здійснює додаткової роботи, але $\varepsilon_\kappa > 1$. В цьому випадку вираз (1) також набирає вигляд формули для ККД циклу ДВЗ, оскільки для циклу з наддуванням ізоентропи *I - II* і *IV - III* співпадають і $T_1 = T_{IV}$. Тому друга дужка в чисельнику виразу (1) перетворюється на нуль.

Представляє інтерес зміна циклу комбінованого двигуна шляхом заміни умовних оборотних процесів ізохорного відведення теплоти **5-1** і ізобарного підведення теплоти **1 - III** реальним процесом адиабатного дроселювання **5 - III**. Цикл комбінованого двигуна після такої заміни представлений на рис. 2.

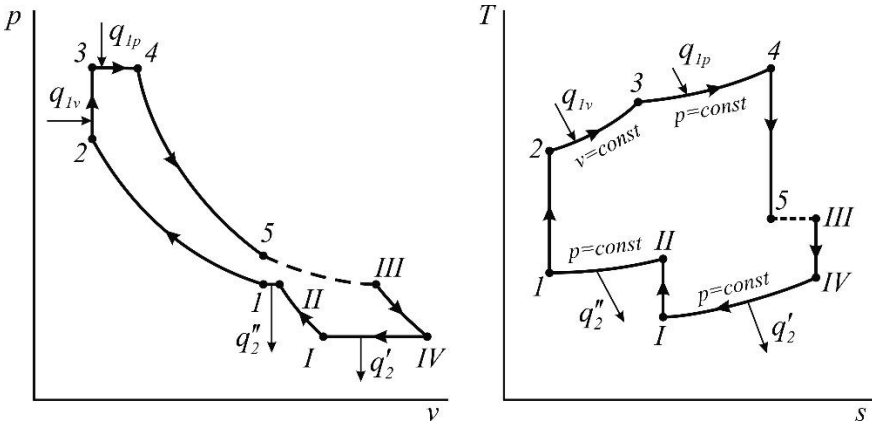


Рис. 2. Цикл комбінованого двигуна з процесом дроселювання **5 - III**

Як відомо, процес дроселювання протікає при постійному значенні ентальпії. У ідеального газу ентальпія залежить тільки від температури, тому процес дроселювання **5 - III** протікає при постійній температурі. На рис. 2 процес **III - IV** означає адиабатне розширення газу в турбіні, а ізобарний процес відведення теплоти **IV - I** відповідає випуску газів, що відпрацювали в турбіні, в атмосферу.

При виведенні виразу для ККД циклу, представленого на рис. 2, слід враховувати, що для цього циклу кількості підведеної і відведеної теплоти відповідно дорівнюють

$$q_1 = c_{v\infty} \cdot (T_3 - T_2) + c_{p0} \cdot (T_4 - T_3) = c_{v\infty} \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot [\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)]. \quad (2)$$

$$q_2 = c_p \cdot (T_{IV} - T_I + T_{II} - T_1). \quad (3)$$

Рівняння (3) можна представити у вигляді (4)

$$\begin{aligned} q_2 &= c_{p0} \cdot (T_{IV} - T_{III} + T_{II} - T_I + T_{III} - T_1) = \\ &= c_v \cdot (\lambda \cdot \rho^k - 1) + k \cdot c_v \cdot \left[T \cdot \left(\frac{T}{T} \right) - 1 + T_{IV} \cdot \left(1 - \frac{T_{III}}{T_{IV}} \right) \right] = \\ &= c_v \cdot T \cdot (\lambda \cdot \rho^k - 1) + k \cdot c_v \cdot (\varepsilon_x^{k-1} - 1) \cdot (T - T). \end{aligned} \quad (4)$$

При цьому перетворенні враховувалося, що значення температури газів, що відпрацювали в ДВЗ T_5 і поступають в турбіну T_{III} , однакові

$$c_{p0} \cdot (T_{III} - T_1) = k \cdot c_{v\infty} \cdot (T_5 - T_1) = k \cdot c_{v\infty} \cdot T_1 \cdot (\lambda \cdot \rho^k - 1). \quad (5)$$

Підставивши вирази (2) і (4) у формулу для розрахунку ККД

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (6)$$

і розділивши чисельник і знаменник на $k \cdot c_{v\infty}$, отримаємо формулу (1) для розрахунку термічного ККД комбінованого двигуна. Таким чином, урахування процесу дроселювання в циклі комбінованого двигуна не впливає на значення термічного ККД.

Відмічена обставина свідчить про те, що заміна безповоротного процесу дроселювання при виведенні виразу (1) для ККД двома оборотними процесами (ізохорним відведенням теплоти і ізобарним підведенням теплоти) є цілком коректною процедурою.

Необхідно підкреслити, що термічний ККД циклу комбінованого двигуна істотно вище ККД звичайного ДВЗ. Так, розрахунки показали [3], що для циклу ДВЗ при ступені підвищення тиску $\lambda = 1,4$, ступеня попереднього розширення $\rho = 1,2$ і початкових параметрах повітря $t_I = 30$ °С, $p_I = 0,101325$ МПа при зміні ступеня стиску ε від 12 до 18, термічний ККД змінюється від 60,9 % до 66,7 %. При включенні до складу установки газової турбіни, що використовує енергію газів, які відпрацювали в ДВЗ, термічний ККД установки складає 72,1 % при $\varepsilon = 12$ і 76,2 % при $\varepsilon = 18$, тобто зростає на 18 % і 14 % відповідно.

Висновки. Аналіз циклу комбінованого двигуна з урахуванням реального процесу дроселювання при випуску газів, що відпрацювали в ДВЗ показав, що це урахування не впливає на розрахунок

термічного ККД циклу. Тому заміна вказаного безповоротного процесу дроселювання при виведенні виразу для ККД двома оборотними процесами ізохорного відведення і ізобарного підведення теплоти цілком допустима.

Перелік використаних джерел

1. Черемісін В.І., Бабенчук М. С., Ігнатенко О.А. Термогідродинамічні процеси. Термодинаміка ідеального газу: навчальний посібник. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 79 с.
2. Вассерман О.А., Слинько О.Г. Термодинамічні процеси та цикли в ідеальному газі. Одеса: Фенікс, 2013. 164 с.
3. Костенко Г.М. Технічна термодинаміка. Державне видавництво технічної літератури. Київ, 1958. 419 с.
4. Rehbichler G. The Bosch Electronic Diesel Control System for Medium and High Speed Engines. [Електронний ресурс]. / G. Rehbichler, C. Kendlbacher, M. Bernhaupt. Режим доступу: https://jxpt.whut.edu.cn/meol/common/script/preview/download_preview.jsp?fileid=518936&resid=64210&lid=5030&preview=preview
5. Mahp B. Future and Potential of Diesel Injection Systems [Електронний ресурс]./ В. Маһр. Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10502-3_1