

УДК 621.44:629.425

### УЧЁТ ПРОЦЕССА ДРОССЕЛИРОВАНИЯ В ЦИКЛЕ КОМБИНИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**А.А. Вассерман**

д.т.н., профессор

кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация»

*Одесский национальный морской университет*

**Аннотация.** Рассматриваются два варианта теоретического цикла комбинированного двигателя, состоящего из дизеля и газотурбинной установки. В первом варианте имеет место изохорный отвод теплоты от газа, отработавшего в ДВС, и её изобарный подвод к газу перед турбиной. Во втором варианте эти два процесса заменены адиабатным дросселированием. В обоих случаях выражения для расчёта термического КПД цикла комбинированного двигателя одинаковы. При включении в состав установки газовой турбины термический КПД повышается на 14–18 % по сравнению с КПД дизеля.

**Ключевые слова:** цикл комбинированного двигателя, двигатель внутреннего сгорания, газотурбинная установка, термический КПД, наддув ДВС, процесс дросселирования.

### УРАХУВАННЯ ПРОЦЕСУ ДРОСЕЛЮВАННЯ В ЦИКЛІ КОМБІНОВАНОГО ДВИГУНА

**О.А. Вассерман**

д.т.н., професор

кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»

*Одеський національний морський університет*

**Анотація.** Розглядаються два варіанти теоретичного циклу комбінованого двигуна, який складається з дизеля та газотурбінної установки. В першому варіанті має місце ізохорне відведення теплоти від газу, який відпрацював у ДВЗ, та її ізобарне підведення до газу перед турбіною. У другому варіанті ці два процеси замінені адиабатним дроселюванням. В обох випадках вирази для розрахунку термічного ККД циклу комбінованого двигуна однакові. При включенні у склад установки газової турбіни термічний ККД підвищується на 14-18 % у порівнянні з ККД дизеля.

**Ключові слова:** цикл комбінованого двигуна, двигун внутрішнього згоряння, газотурбінна установка, термічний ККД, наддув ДВЗ, процес дроселювання.

© Вассерман А.А., 2018

UDC 621.44:629.425

## REGISTRATION PROCESS OF THROTTLING AT CYCLE OF COMBINED ENGINE

A.A. Vasserman

doctor of technical sciences, professor of the department  
«Ship power plants and technical operation»

*Odessa National Maritime University*

**Abstract.** *Two versions of theoretic cycle of combined engine which consist of diesel engine and gas turbine plant are considered. At first version take place isochoric drain of heat from gas, which worked in ICE, and its isobaric feed to gas before turbine. At second version these two processes are replaced by adiabatic throttling. At both cases the expressions for calculation the thermal coefficient of efficiency of combined engine cycle are identical. At inclusion in plant gas turbine the thermal coefficient of efficiency is higher on 14-18 % at comparison with that characteristic of diesel engine.*

**Keywords:** *cycle of combined engine, internal combustion engine, gas turbine plant, thermal coefficient of efficiency, supercharge of ICE, process of throttling.*

**Введение.** При рассмотрении цикла комбинированного двигателя, состоящего из дизеля и газотурбинной установки, не учитывалось, что процесс выпуска отработавших газов из ДВС в выпускной коллектор является процессом дросселирования. Этот необратимый процесс заменялся двумя обратимыми процессами отвода и подвода теплоты. Поэтому в настоящей работе анализируется такой цикл с включением реально протекающего процесса дросселирования.

**Целью статьи** является учёт процесса дросселирования при изображении цикла комбинированного двигателя на рабочей и тепловой диаграммах и проверка влияния этого процесса на расчёт термического КПД цикла.

**Изложение основного материала.** При построении теоретического цикла комбинированного двигателя на основании известных допущений заменяют разомкнутые рабочие процессы ДВС и ГТУ термодинамическими циклами (рис. 1). Они построены для весьма распространённой изобарной системы наддува, когда газы, отработавшие в цилиндрах ДВС, направляются в выпускной коллектор большого объёма, а оттуда практически при постоянном давлении – в газовую турбину. При этом ГТУ используется как для обеспечения наддува ДВС, так и для совершения дополнительной работы.

При выпуске в коллектор газы расширяются без теплообмена, но при этом не выполняют работу, то есть имеет место необратимое адиабатное дросселирование. Этот процесс обычно заменяют двумя обратимыми процессами: изохорным отводом теплоты от газа (5-1) после его расширения в цилиндрах ДВС и изобарным подводом того же количества теплоты к газу (1-III) перед его изоэнтропным расширением в турбине [1; 2].

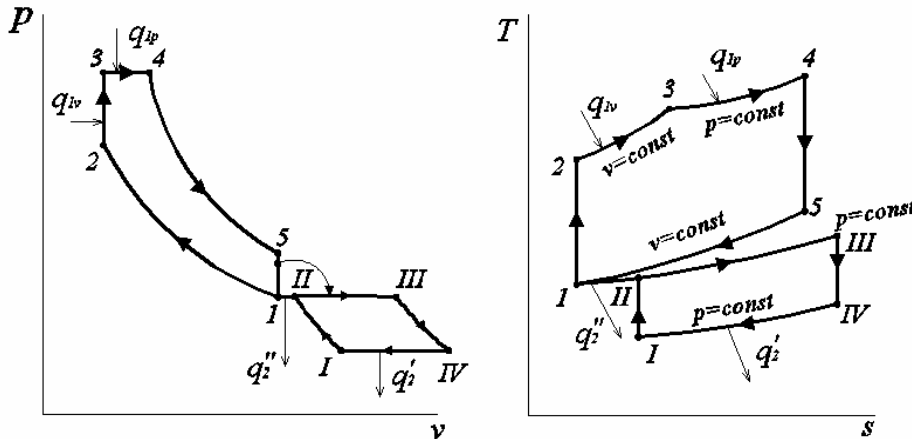


Рис. 1. Цикл комбинированного двигателя

Таким образом, рассматриваемый цикл состоит из циклов: поршневого ДВС  $1-2-3-4-5-1$  и газотурбинной установки  $I-II-III-IV-I$ . Цикл ДВС включает: изоэнтропное сжатие  $1-2$ , изохорный  $2-3$  и изобарный  $3-4$  подвод теплоты к рабочему телу, изоэнтропное расширение  $4-5$  и изохорный отвод теплоты  $5-1$  от газа после его расширения. Цикл ГТУ включает изоэнтропное сжатие воздуха  $I-II$  в компрессоре, изобарный процесс отвода теплоты  $II-I$  от этого воздуха в охладителе, изобарный процесс подвода теплоты  $I-III$  к газу перед турбиной, изоэнтропное расширение газа  $III-IV$  в турбине и изобарный процесс отвода теплоты  $IV-I$  от газа в окружающую среду. Как отмечено выше, теплота отводится также в процессе  $II-I$  от сжатого компрессором воздуха перед его поступлением в ДВС.

Формула для расчёта термического КПД комбинированного двигателя получена в работе [2] и имеет вид

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

где  $\varepsilon_\kappa = v_I/v_{II}$  – степень сжатия воздуха в компрессоре.

Из выражения (1) при условии  $\varepsilon_k = 1$  получается известная формула для термического КПД цикла ДВС со смешанным подводом теплоты. В цикле дизеля с газотурбинным наддувом ГТУ не совершает дополнительной работы, но  $\varepsilon_k > 1$ . В этом случае выражение (1) также принимает вид формулы для КПД цикла ДВС, так как для цикла с наддувом изоэнтропы  $I-II$  и  $IV-III$  совпадают и  $T_I = T_{IV}$ . Поэтому вторая скобка в числителе выражения (1) превращается в нуль.

Представляет интерес изменение цикла комбинированного двигателя путём замены условных обратимых процессов изохорного отвода теплоты ( $5-I$ ) и изобарного подвода теплоты ( $1-III$ ) реальным процессом адиабатного дросселирования ( $5-III$ ). Цикл комбинированного двигателя после такой замены представлен на рис. 2.

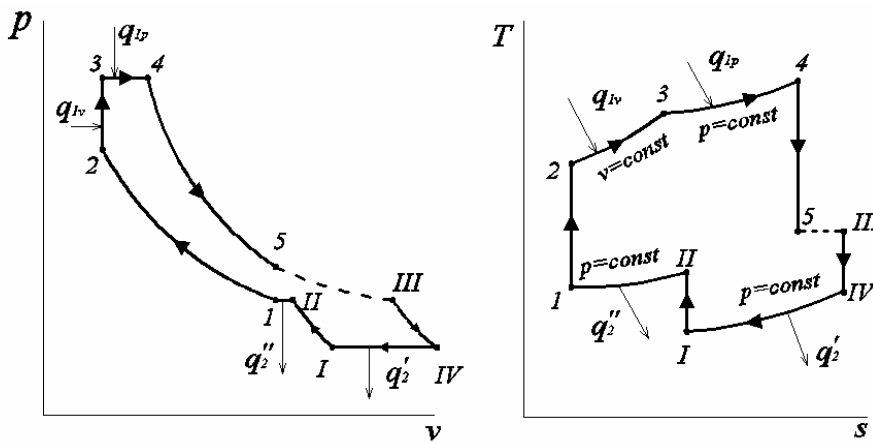


Рис. 2. Цикл комбинированного двигателя с процессом дросселирования 5-III

Как известно, процесс дросселирования протекает при постоянном значении энтальпии. У идеального газа энтальпия зависит только от температуры, поэтому процесс дросселирования  $5-III$  протекает при постоянной температуре. На рис. 2 процесс  $6-7 III-IV$  означает адиабатное расширение газа в турбине, а изобарный процесс отвода теплоты  $7-I$  соответствует выпуску газов, отработавших в турбине, в атмосферу.

При выводе выражения для КПД цикла, представленного на рис. 2, следует учесть, что для этого цикла количества подведенной и отведенной теплоты соответственно равны

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

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

Уравнение (3) можно представить в виде

$$\begin{aligned} q_2 &= c_{p0}(T_{IV} - T_{III} + T_{II} - T_I + T_{III} - T_I) = \\ &= c_{v\infty}T_1(\lambda\rho^k - 1) + kc_{v\infty}[T_1(T_{II}/T_1 - 1) + \\ &+ T_{IV}(1 - T_{III}/T_{IV})] = c_{v\infty}T_1(\lambda\rho^k - 1) + kc_{v\infty}(\epsilon_k^{k-1} - 1)(T_I - T_{IV}), \end{aligned} \quad (4)$$

При этом преобразовании учитывалось, что значения температуры газов, отработавших в ДВС  $T_5$  и поступающих в турбину  $T_{III}$ , одинаковы

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

Подставив выражения (2) и (4) в формулу для расчёта КПД

$$= 1 - q_2/q_1 \quad (6)$$

и разделив числитель и знаменатель на  $c_{v\infty}T_1$ , получим формулу (1) для расчёта термического КПД комбинированного двигателя. Таким образом, учёт процесса дросселирования в цикле комбинированного двигателя не влияет на значение термического КПД.

Отмеченное обстоятельство свидетельствует о том, что замена необратимого процесса дросселирования при выводе выражения (1) для КПД двумя обратимыми процессами (изохорным отводом и изобарным подводом теплоты) является вполне корректной процедурой.

Необходимо подчеркнуть, что термический КПД цикла комбинированного двигателя существенно выше КПД обычного ДВС. Так, расчеты показали [3], что для цикла ДВС при степени повышения давления  $\lambda = 1,4$ , степени предварительного расширения  $\rho = 1,2$  и начальных параметрах воздуха  $t_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 0,101325$  МПа при изменении степени сжатия  $\epsilon$  от 12 до 18 термический КПД изменяется от 60,9 % до 66,7 %. При включении в состав установки газовой турбины, использующей энергию отработавших газов ДВС, термический КПД установки составляет 72,1 % при  $\epsilon = 12$  и 76,2 % при  $\epsilon = 18$ , то есть возрастает на 18 % и 14 % соответственно.

**Выводы.** Анализ цикла комбинированного двигателя с учётом реального процесса дросселирования при выпуске отработавших газов из ДВС показал, что этот учёт не влияет на расчёт термического КПД цикла. Поэтому замена указанного необратимого процесса при выводе выражения для КПД двумя обратимыми процессами изохорного отвода и изобарного подвода теплоты вполне допустима.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фомин Ю.Я., Горбань А.И. и др. Судовые двигатели внутреннего сгорания. – Л., 1989. – 344 с.
2. Вассерман О.А., Слынько О.Г. Термодинамічні процеси та цикли в ідеальному газі. – Одеса: Фенікс, 2013. – 164 с.
3. Повышение эффективности и мощности двигателей внутреннего сгорания. 2. Цикл с охлаждением воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя / А.А. Вассерман, А.Г. Слынько / Технические газы. – 2018. – № 4. – С. 34-38.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2018

#### Рецензенти:

доктор технічних наук, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Р.А. Варбанець**

кандидат технічних наук, завідувач кафедри «Суднова теплоенергетика» Національного університету «Одеська морська академія» **О.В. Кіріс**