

8.4. Цикл ГТУ с многоступенчатым сжатием воздуха и многоступенчатым расширением газа

Как было установлено выше, в ГТУ значительная доля работы затрачивается на сжатие воздуха в компрессоре. Поэтому для повышения экономичности ГТУ следует всемерно стремиться к уменьшению работы компрессора.

Работа, затрачиваемая на сжатие воздуха в компрессоре, есть техническая работа, определяемая выражением (3.2) $l_K = - \int v dp$. Очевидно, что она будет тем меньше, чем меньше удельный объем сжимаемого воздуха, который, в свою очередь, тем меньше, чем меньше его температура. С этой целью, например, в тихоходных поршневых компрессорах производят охлаждение воздуха в процессе его сжатия в цилиндре. В ГТУ же, где применяются ротационные компрессоры, охлаждение воздуха в процессе сжатия невозможно, процесс в них протекает адиабатно и сопровождается значительным ростом температуры воздуха. Поэтому уменьшить затрачиваемую работу здесь возможно только, если по достижении некоторого промежуточного давления воздух вывести из компрессора в теплообменник, где охладить его до первоначальной температуры, а затем снова направить в следующую ступень компрессора для продолжения сжатия.

С другой стороны, на примере цикла ПТУ, было показано, что увеличить среднюю температуру подвода теплоты в цикле и работу турбины можно, если при расширении рабочего тела при некотором промежуточном давлении к нему подвести дополнительное количество теплоты. Это должно привести к повышению КПД цикла.

Осуществление этих общих соображений рассмотрим на примере ГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха и двухступенчатым расширением газа, принципиальная схема которой приведена на рис. 8.12, а действительный цикл в T,s диаграмме - на рис. 8.13. Атмосферный воздух сначала сжимается необратимо адиабатно в компрессоре низкого давления КНД до состояния 2_д при промежуточном давлении p_2 . Затем он направляется в промежуточный охладитель ОХ где при постоянном давлении отдает теплоту охлаждающей воде и температура его снижается до первоначальной (т.ч. 3 на рис. 8.13). После этого в компрессоре высокого давления КВД воздух сжимается адиабатно необратимо до состояния 4_д при конечном давлении p_4 , с которым поступает в камеру сгорания высокого давления КСВД, куда подается и топливо. При изобарном сгорании топлива здесь образуются продукты сгорания состояния 5.

Адиабатное необратимое расширение этого газа сначала производится в турбине высокого давления ТВД до давления p_6 , с которым он поступает в камеру сгорания низкого давления КСНД, куда также подается топливо. В продуктах сгорания после КСВД остается еще большое количество кислорода, что позволяет провести процесс изобарного сгорания топлива и в КСНД, в результате чего температура рабочего тела повышается до T_7 . Окончательное расширение газа до

атмосферного давления происходит в турбине низкого давления ТНД и в состоянии 8_d он выбрасывается в атмосферу.

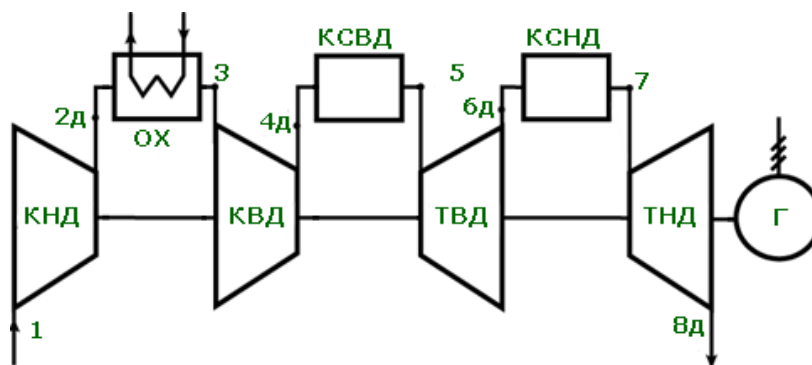


Рис. 8.12

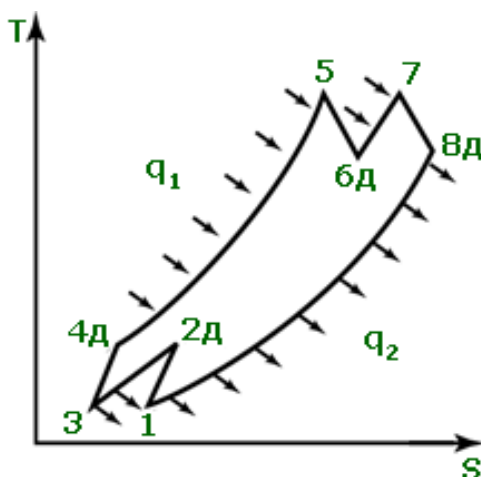


Рис. 8.13

Работа такой ГТУ определяется как разность работ двух турбин и двух компрессоров

$$l_{ГТУ}^o = l_{ТВД}^o + l_{ТНД}^o - l_{КВД}^o - l_{КНД}^o,$$

а подведенная теплота – как сумма теплот, подведенных в двух камерах сгорания

$$q_1^o = q_{КСВД}^o + q_{КСНД}^o,$$

и формула для внутреннего КПД цикла принимает вид

$$\eta_i^{mn} = \frac{l_{ГТУ}^o}{q_1^o} = \frac{(h_5 - h_{6d}) + (h_7 - h_{8d}) - (h_{2d} - h_1) - (h_{4d} - h_3)}{(h_5 - h_{4d}) + (h_7 - h_{6d})} \quad (8.16)$$

Важной задачей при расчете многоступенчатого цикла является выбор промежуточных давлений при сжатии воздуха и при расширении газа. Подойти к ее решению при выборе промежуточных давлений сжатия в компрессорах можно следующим образом.

Естественным является стремление распределить давления таким образом, чтобы суммарная работа сжатия воздуха была бы наименьшей. Работу, затрачиваемую в каждом компрессоре,

можно представить уравнением (3.14). Просуммировав их и исследовав сумму на минимум, найдем, что минимальная работа сжатия достигается, когда степени повышения давления в каждом компрессоре β_i одинаковы. Отсюда

$$\beta_i = \sqrt[z]{p_{\text{конечн}} / p_1} \quad (i=1,2,\dots,z) \quad (8.17)$$

где $p_{\text{конечн}}$ -конечное давления сжатого воздуха, z –число ступеней сжатия. При таком распределении давлений в каждом компрессоре затрачивается одинаковая работа. Аналогично можно установить, что максимальная работа расширения газа получается, когда степени понижения давления в каждой турбине β_i^T одинаковы и равны

$$\beta_i^T = \sqrt[y]{p_{\text{конечн}} / p_1} \quad (i=1,2,\dots,y) \quad (8.18)$$

где y -число ступеней расширения газа (число турбин). Заметим, что число компрессоров и турбин в ГТУ не превышает трех.

При распределении давлений между компрессорами и турбинами могут дополнительно учитываться и другие условия. Например, ГТУ с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением может быть выполнена не в одновальном, а в двухвальном варианте, причем на одном валу расположены компрессоры и одна из турбин, на другом –турбина и генератор. В этом случае промежуточное давление при расширении газа выбирается так, чтобы мощность турбины на компрессорном валу равнялась мощности компрессоров.