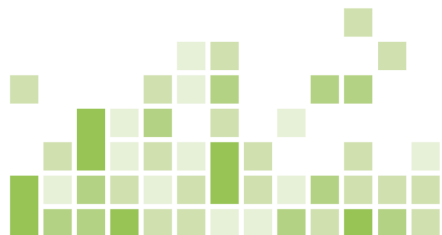




**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 7. Циклы газотурбинных и паротурбинных установок

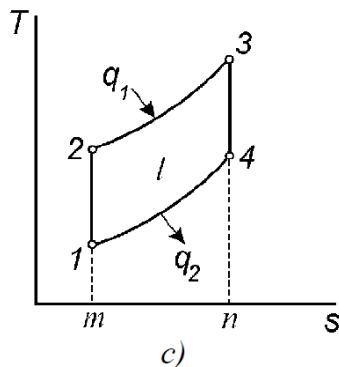
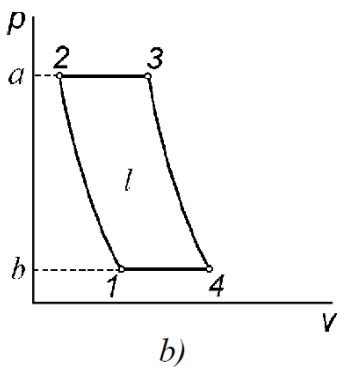
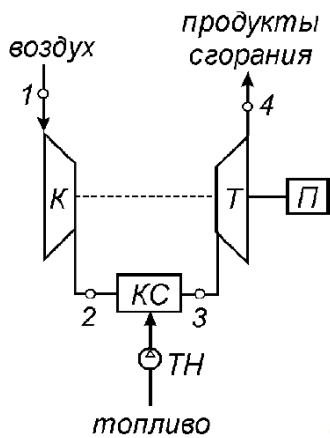
11 марта
2016



Назначением газо- и паротурбинных установок (ГТУ и ПТУ) является производство полезной работы за счет теплоты. Источником теплоты может служить органическое или ядерное топливо, характеризующееся теплотой сгорания Q_H^P или энергией деления единицы массы ядерного горючего, которая воспринята рабочим телом (теплоносителем) Q .

ГТД и ГТУ широко используются в различных областях: на транспорте (в авиации, Морфлоте), в энергетике (для получения электроэнергии), для привода стационарных установок: компрессоров, насосов и др. Газовые турбины могут развивать большие мощности от 100 до 200 МВт.

Во всех газотурбинных двигателях и установках, кроме авиационных двигателей, используется цикл со сгоранием топлива при $p = \text{const}$.



a)

b)

c)

Принципиальная схема и цикл ГТД со сгоранием топлива при постоянном давлении

К – компрессор, Т – газовая турбина, КС – камера сгорания, ТН – топливный насос, П – потребитель



Работа, получаемая в турбине (внешняя работа адиабатного процесса 3–4), изображается в p - v -диаграмме площадью a –3–4– b , которая равна:

$$l_T = h_3 - h_4 \quad (1)$$

Часть работы турбины затрачивается на сжатие воздуха в компрессоре (площадь a –2–1– b):

$$l_K = h_2 - h_1 \quad (2)$$

Разность этих работ является полезной работой, передаваемой потребителю (площадь цикла 1–2–3–4):

$$l = l_T - l_K \quad (3)$$

Подводимая теплота в цикле – теплота изобарного процесса 2–3 (в T - s -диаграмме – площадь m –2–3– n):

$$q_1 = h_3 - h_2 \quad (4)$$



Отводимая теплота представляет собой теплоту изобарного процесса 4–1 (в Ts -диаграмме – площадь $m-1-4-n$):

$$q_2 = h_4 - h_1 \quad (5)$$

Разность подводимой и отводимой теплоты – полезная работа

$$l = q_1 - q_2 \quad (6)$$

Термический КПД цикла рассчитывается по формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (7)$$

Одной из характеристик цикла газотурбинного двигателя является степень повышения давления в компрессоре $\beta = p^2/p_1$. При условии $c_p = \text{const}$ можно получить:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \quad (8)$$



Согласно данной формуле термический КПД растет с увеличением β по экспоненте, соответственно увеличивается температура сжатого воздуха T_2 и температура газов перед турбиной T_3 , которая ограничивается жаропрочностью металла лопаток турбины. В газотурбинных двигателях с циклом Брайтона $t_3 = (700 \div 800) \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует значениям $\beta = (4 \div 6)$.



Затрачиваемая работа в процессе 1–2_o
(внутренняя работа компрессора)
вычисляется по формуле

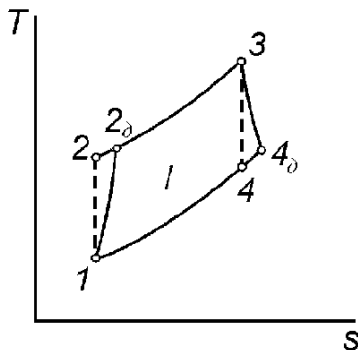
$$l_i^K = h_{2_o} - h_1 \quad (9)$$

Работа расширения в процессе 3–4_o
(внутренняя работа турбины)

$$l_i^T = h_3 - h_{4_o} \quad (10)$$

Степень необратимости процесса сжатия 1–2_o характеризуется
внутренним относительным КПД компрессора

$$\eta_{oi}^K = \frac{h_2 - h_1}{h_{2_o} - h_1} \quad (11)$$





Степень необратимости процесса расширения $3-4_o$ характеризуется внутренним относительным КПД турбины

$$\eta_{oi}^T = \frac{h_3 - h_{4_o}}{h_3 - h_4} \quad (12)$$

Работу действительного цикла называют внутренней работой цикла

$$l_i = l_i^T - l_i^K \quad (13)$$

Теплота, подводимая в действительном цикле, равна

$$q_{1_o} = h_3 - h_{2_o} \quad (14)$$

Отводимая теплота в действительном цикле равна

$$q_{2_o} = h_{4_o} - h_1 \quad (15)$$

Эффективность действительного цикла характеризуется внутренним КПД, определяемым по формуле

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_{1_o}} = 1 - \frac{q_{2_o}}{q_{1_o}} \quad (16)$$



Внутренний КПД цикла учитывает потери от необратимости процессов сжатия и расширения, а также потери тепла, уносимые с отработавшими газами $q_{2\delta}$. Все эти потери существенно возрастают с увеличением степени повышения давления воздуха в компрессоре $\beta = p_2/p_1$.

Потери теплоты в камере сгорания учитывается КПД

$$\eta_{\text{КС}} = \frac{q_{1\delta}}{q'} \quad (17)$$

где q' – теплота, выделившаяся при сгорании топлива в расчете на 1 кг образовавшихся продуктов сгорания, кДж/кг.

Механические потери (потери на трение) учитываются механическим КПД компрессора $\eta_{\text{М}}^{\text{К}}$ и турбины $\eta_{\text{М}}^{\text{Т}}$.



Работа на валу ГТД (переданная потребителю) называется эффективной и рассчитывается по формуле

$$l_e = l_i^T \eta_M^T - l_i^K \eta_M^K \quad (18)$$

Все потери в ГТД учитывает эффективный КПД

$$\eta_e = \frac{l_e}{q'} = \frac{N_e}{BQ_H^p} \quad (19)$$

где $N_e = l_e \cdot G$ – эффективная мощность, кВт; G – массовый расход рабочего тела, кг/с; B – массовый расход топлива, кг/с; Q_H^p – теплота сгорания топлива.

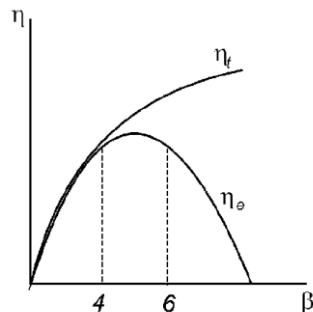


зависимость термического и эффективного КПД цикла ГТД от степени повышения давления воздуха в компрессоре

Оптимальный диапазон значений β , при которых η_e имеет максимум, составляет (4 ÷ 6). При более высоких значениях β снижается η_e из-за резкого увеличения потерь необратимости процессов сжатия и расширения рабочего тела. Для ГТД с циклом Брайтона $\eta_e = (17 \div 20) \%$.

С помощью КПД можно рассчитать составляющие уравнения теплового баланса ГТД

$$q' = l_e + q_{ном}^{КС} + q_{ном}^{\partial z} + l_{ном}^K + l_{ном}^T$$





где $q_{пот}^{КС} = q' - q_{1\delta}$ – потери тепла в камере сгорания,

$q_{пот}^{\delta\sigma} = q_{2\delta} = h_{4\delta} - h_1$ – потери тепла с уходящими дымовыми
газами,

$l_{пот}^K = l_i^K / \eta_m^K - l_i^K$ – механические потери в компрессоре,

$l_{пот}^T = l_i^T - \eta_m^T l_i^T$ – механические потери в турбине.

Для повышения тепловой экономичности ГТУ, используемых для привода различных механизмов, применяются:

- многоступенчатое сжатие воздуха в компрессоре,
- многоступенчатое расширение газа в турбине,
- регенерация теплоты.

В результате эффективный КПД в ГТУ достигает 35 %.



Газотурбинная установка – тепловой двигатель, рабочее тело в котором остается газообразным во всех точках теплового цикла, и состоящий из турбины, компрессора, устройства подвода и отвода теплоты, объединенных общей гидромеханической системой.

Газотурбинная установка для высокотемпературного газоохлаждаемого реактора – это ГТУ замкнутого цикла, в которой рабочее тело (газ) непрерывно циркулирует по замкнутому контуру, а подвод теплоты к нему осуществляется в технологических каналах активной зоны ядерного реактора.

Замкнутая ГТУ состоит из газового компрессора 1, 2, турбины 3, регенератора 6, газоохладителей 4 и 5. Подвод теплоты производится в активной зоне 7 (рисунок):



Регулирование мощности ГТУ производится за счет изменения количества рабочего тела (газа), циркулирующего в контуре. При постоянных значениях температуры газа перед газовой турбиной 3 и компрессором низкого давления (КНД) расход газа прямо пропорционален давлению в соответствующих точках контура. Изменение давления в контуре обеспечивается соединением контура ГТУ с емкостями высокого 9 и низкого давлений 8. Между емкостями установлен перекачивающий компрессор 11. Валы электрогенератора, турбины 3, компрессоров низкого 1 и высокого 2 давлений соединены жестко, либо механическими передачами. Они, как правило, за исключением электрогенератора, имеют общий осесимметричный корпус.