

# Циклы газотурбинных установок (ГТУ)

## Недостатки поршневых ДВС:

- ▶ ограниченность мощности;
- ▶ невозможность адиабатного расширения рабочего тела до атмосферного давления (в поршневых двигателях объем газов при расширении ограничен объемом цилиндра).

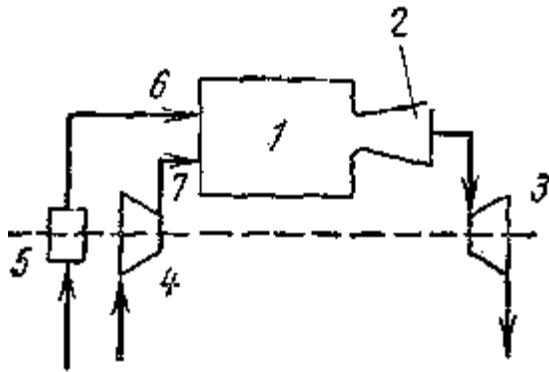
## Преимущества ГТУ:

- ▶ относительно малый вес и небольшие габариты;
- ▶ малый срок монтажа и окупаемости;
- ▶ нет деталей с возвратно-поступательным движением.

## Недостатки ГТУ:

- ▶ необходимость повышения начальной температуры газа перед турбиной, чтобы увеличить термический к. п. д. цикла установки;
- ▶ водяное или газовое охлаждение элементов газовой турбины недостаточно надежно и конструктивно сложно;
- ▶ необходимость компактного регенеративного газоздушного теплообменника;
- ▶ необходимость повышения эффективного к. п. д. компрессора, входящего в схему установки (75% мощности газовой турбины расходуется на привод компрессора).

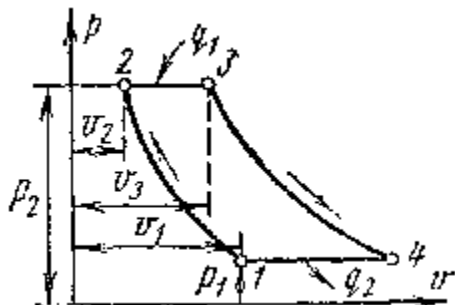
**Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе  $p = \text{const}$**



В камеру сгорания 1 через форсунки 6 и 7 непрерывно поступает воздух из турбокомпрессора 4 и топливо из топливного насоса 5.

Из камеры продукты сгорания направляются в комбинированные сопла 2, в которых рабочее тело расширяется до давления, близкого к атмосферному.

Из сопел продукты сгорания поступают на лопатки газовой турбины 3, а затем выбрасываются в атмосферу через выхлопной патрубок.



В идеальном цикле ГТУ отвод теплоты от рабочего тела производится не по изохоре, как это имеет место в двигателях внутреннего сгорания, а по изобаре.

Характеристики цикла:

степень повышения давления в компрессоре  $b = p_2 / p_1$

степень изобарного расширения  $r = J_3 / J_2$ .

Подводимая теплота  $q_1 = c_p (T_3 - T_2)$

Отводимая теплота  $q_2 = c_p (T_4 - T_1)$

Термический к.п.д. цикла

$$h_t = 1 - q_2 / q_1 = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) .$$

Выразим температуры  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  через начальную температуру рабочего тела  $T_1$  :

для адиабаты 1-2

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{(k-1)/k} = b^{(k-1)/k}$$

$$T_2 = T_1 b^{(k-1)/k}$$

для изобары 2-3

$$T_3 / T_2 = J_3 / J_2 = r; \quad T_3 = T_2 r; \quad T_3 = T_1 b^{(k-1)/k} r$$



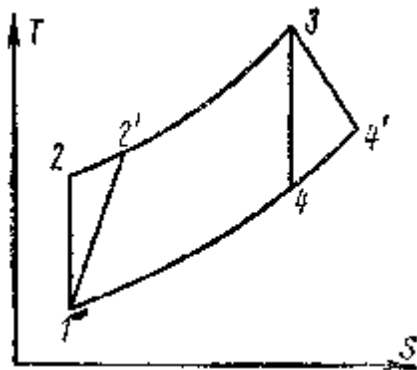
для адиабаты 3–4

$$T_4 / T_3 = (p_4 / p_3)^{(k-1)/k} = (p_1 / p_1 b)^{(k-1)/k} = 1 / b^{(k-1)/k} ;$$

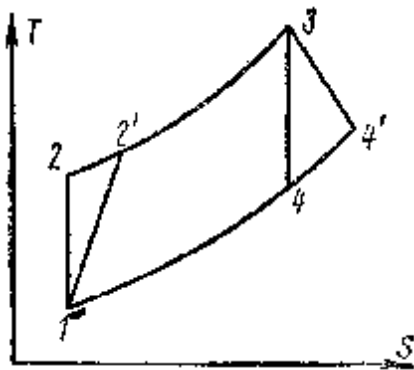
$$T_4 = T_1 b^{(k-1)/k} r \frac{1}{b^{(k-1)/k}} = T_1 r$$

Получаем

$$h_t = 1 - \frac{T_1 r - T_1}{T_1 b^{(k-1)/k} r - T_1 b^{(k-1)/k}} = 1 - \frac{1}{b^{(k-1)/k}}$$



Теоретический цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  на  $Ts$ -диаграмме изображается пл.  $12341$ , а реальный цикл пл.  $12'34'1$ , где линия  $1-2'$  представляет собой условную необратимую ( $\Delta s > 0$ ) адиабату сжатия в компрессоре, а линия  $3-4'$  – условную необратимую ( $\Delta s > 0$ ) адиабату расширения в турбине.



Расширение газа в турбине сопровождается потерями на трение о стенки сопл, лопаток и на завихрения потока, в результате чего часть кинетической энергии рабочего тела превращается в теплоту и энтальпия газа на выходе из турбины  $i_{4'}$  будет больше энтальпии обратимого процесса расширения  $i_4$ .

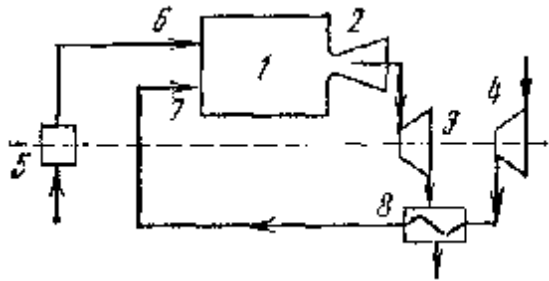
Теоретическая работа расширения в турбине равна  $l_T = i_3 - i_4$ , а действительная работа расширения  $l_i^T = i_3 - i_{4'}$ .

## **Методы повышения к.п.д. ГТУ**

Термический к. п. д. ГТУ со сгоранием топлива при  $p = \text{const}$  растет с увеличением степени повышения давления  $\beta$ . Однако с ростом  $\beta$  увеличивается и температура газов в конце сгорания топлива  $T_3$ , в результате чего быстро разрушаются лопатки турбин и сопловые аппараты, охлаждение которых затруднительно.

Чтобы увеличить к. п. д. ГТУ:

- ▶ применять регенерацию теплоты;
- ▶ многоступенчатое сжатие воздуха в компрессоре;
- ▶ многоступенчатое сгорание.



Сжатый воздух из турбокомпрессора направляется в регенератор 8, где получает теплоту при постоянном давлении от газов, вышедших из камеры сгорания 1 через сопло 2 в турбину 3. Подогретый воздух из регенератора 8 через форсунку 7, а топлив

из топливного насоса 5 через форсунку 6 направляется в камеру сгорания 1.

Идеальный цикл ГТУ с регенерацией теплоты:



1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре;  
2-5 – изобарный подвод теплоты к воздуху в регенераторе;  
5-3 – подвод теплоты при постоянном

давлении в камере сгорания;

3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания в соплах турбины;

4-6 – изобарный отвод теплоты от газов в регенераторе;

6-1 – изобарный отвод теплоты от газов на выходе из регенератор; теплоприёмнику (окр. среде).

Если предположить, что охлаждение газов в регенераторе происходит до температуры воздуха, поступающего в него, т.е. от  $T_4$  до  $T_6 = T_2$ , то регенерация будет полная.

Термический к.п.д. цикла при полной регенерации, когда  $T_4 - T_6 = T_5 - T_2$ , найдем по уравнению

$$h_T = 1 - q_2 / q_1,$$

где  $q_1 = c_p (T_3 - T_5) = c_p (T_3 - T_4),$

а  $q_2 = c_p (T_6 - T_1) = c_p (T_2 - T_1),$



тогда  $h_t = 1 - [(T_2 - T_1)/(T_3 - T_4)]$

Температуры в основных точках цикла:

$$T_2 = T_1 (p_2 / p_1)^{(k-1)/k} = T_1 b^{(k-1)/k};$$

$$T_3 = T_1 b^{(k-1)/k} r;$$

$$T_4 = T_1 r$$

К.п.д. цикла  $h_{m.pez} = 1 - 1/r = 1 - T_1 / T_4$

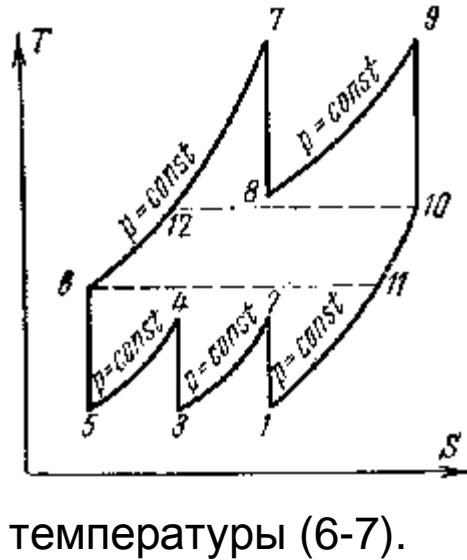
Практически полную регенерацию осуществить нельзя вследствие ограниченных размеров регенераторов и наличия конечной разности температур между нагреваемым и охлаждаемым потоками газа.

Экономичность ГТУ можно повысить, осуществив изотермический подвод и отвод теплоты.

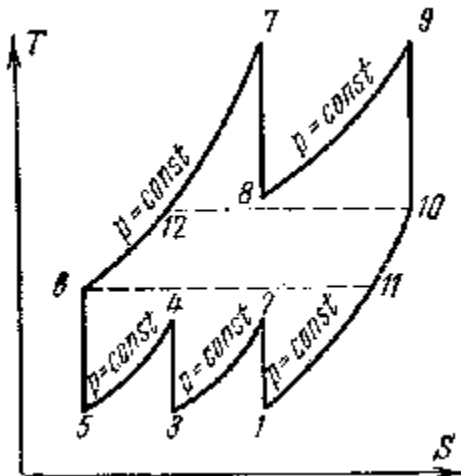
В газовых турбинах для приближения действительного процесса подвода теплоты к изотермическому применяют ступенчатое сгорание с расширением продуктов сгорания в отдельных ступенях турбины.

Исходя из технико-экономических соображений ГТУ делают с двухступенчатым расширением и трехступенчатым сжатием.

Атмосферный воздух последовательно сжимается в отдельных ступенях компрессора (1-2, 3-4, 5-6) и охлаждается в промежуточных холодильниках (2-3, 4-5). Сжатый до высокого давления воздух поступает в первую камеру сгорания, где нагревается до максимальной



температуры (6-7).



После расширения в турбине (7-8) газ поступает во вторую камеру сгорания, где вследствие сжигания топлива при постоянном давлении он опять нагревается до предельной температуры (8-9). Затем продукты сгорания расширяются во второй турбине (или во второй ступени турбины) (9-10) и выбрасываются в атмосферу.

Если в ГТУ осуществляется цикл с регенерацией теплоты, то нагревание сжатого воздуха (6-12) может быть произведено за

счет охлаждения выхлопных газов (10-11).

Все действительные ГТУ работают по разомкнутой схеме, в которой продукты сгорания после работы на лопатках турбины выбрасываются в атмосферу (11-1).

*Отработавший газ после газовой турбины целесообразно направлять в теплообменный аппарат для подогрева воздуха, поступающего в камеру сгорания, или направлять для нужд коммунального хозяйства на получение горячей воды, пара и т. д.*