



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 8. Циклы реальных тепловых машин



Цикл Карно – идеальный термодинамический цикл, имеющий наибольший КПД из всех возможных. Однако если попытаться реализовать этот цикл в реальной тепловой машине, то окажется, что эта задача если и реализуема, то чрезвычайно сложна. Более того, и общая экономичность машины, в которой реализуется такой цикл может оказаться не самой большой. В этом парадоксе разберемся позднее, а пока познакомимся с циклами, реализуемыми в реальных тепловых машинах.

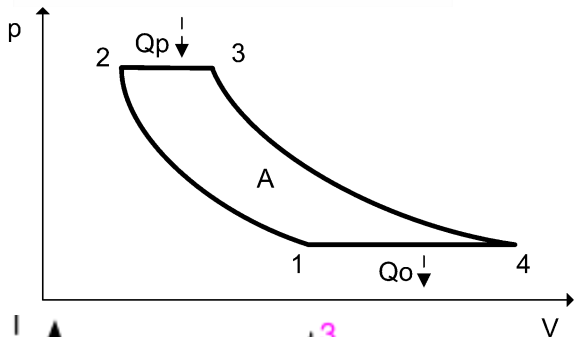


Цикл Брайтона/Джоуля – термодинамический цикл, описывающий рабочие процессы газотурбинного, турбореактивного и прямого воздушного реактивного двигателей внутреннего сгорания, а также газотурбинных двигателей внешнего сгорания с замкнутым контуром газообразного (однофазного) рабочего тела.

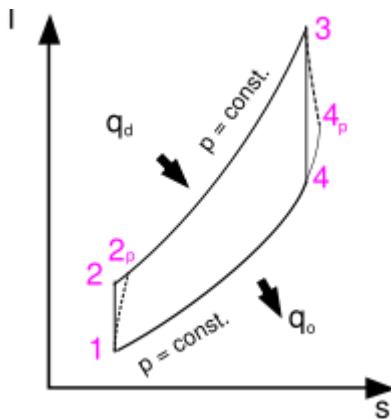


Цикл назван в честь американского инженера Джорджа Брайтона, который изобрёл поршневой двигатель внутреннего сгорания, работавший по этому циклу.

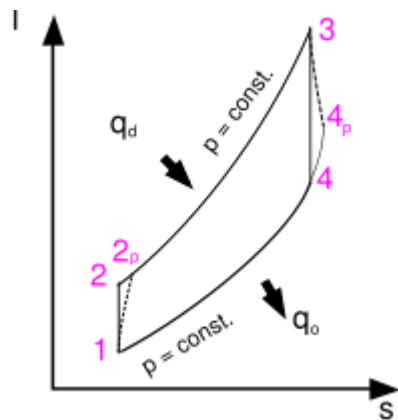
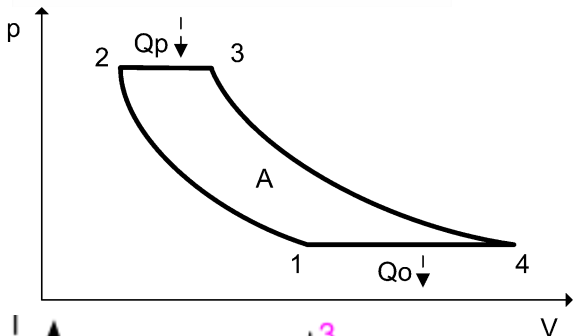
Иногда этот цикл называют также циклом Джоуля – в честь английского физика Джеймса Джоуля, установившего механический эквивалент тепла.



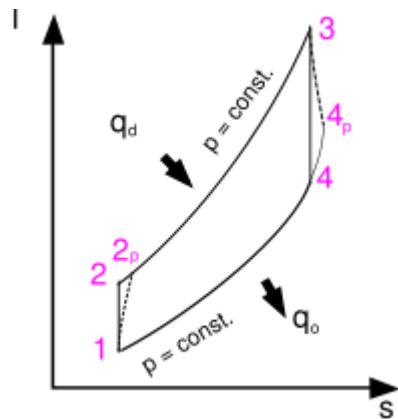
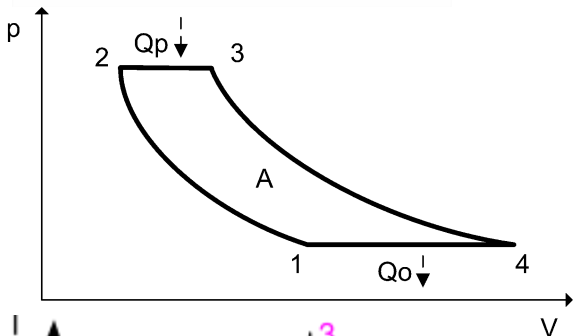
Идеальный цикл
Брайтона состоит из
процессов:
1-2 Изобарическое
сжатие.



2-3 Изобарическое расширение
(подвод теплоты).
3-4 Изобарическое
расширение.
4-1 Изобарическое сжатие
(отвод теплоты).



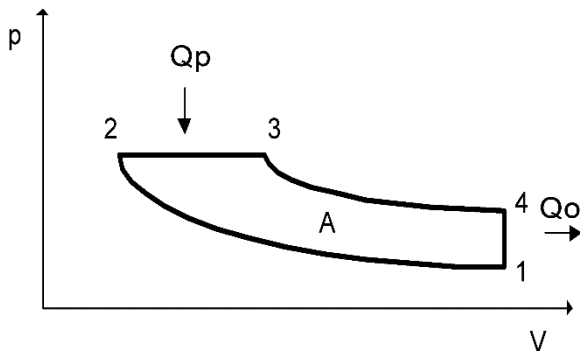
С учётом отличий реальных адиабатических процессов расширения и сжатия от изоэнтропических, строится *реальный* цикл Брайтона (1-2_p-3-4_p-1 на *T-S* диаграмме).



Термический КПД идеального цикла Брайтона принято выражать формулой:

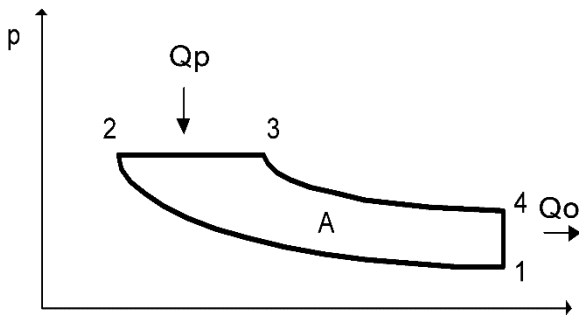
$$\eta = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

где $\beta = \frac{p_2}{p_1}$ — степень повышения давления в процессе адиабатического сжатия (1-2); k — показатель адиабаты.



Цикл Дизеля –
термодинамический
цикл, описывающий
рабочий процесс
двигателя внутреннего

сгорания с воспламенением впрыскиваемого топлива от разогретого рабочего тела, цикл дизельного двигателя.



Идеальный цикл
Дизеля состоит из
четырёх процессов:

1-2 адиабатное сжатие
рабочего тела;

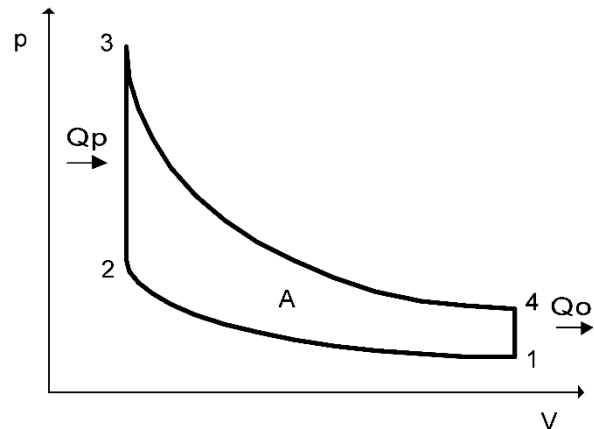
2-3 изобарный подвод Q_p теплоты к рабочему телу;

3-4 адиабатное расширение рабочего тела;

4-1 изохорное охлаждение рабочего тела.

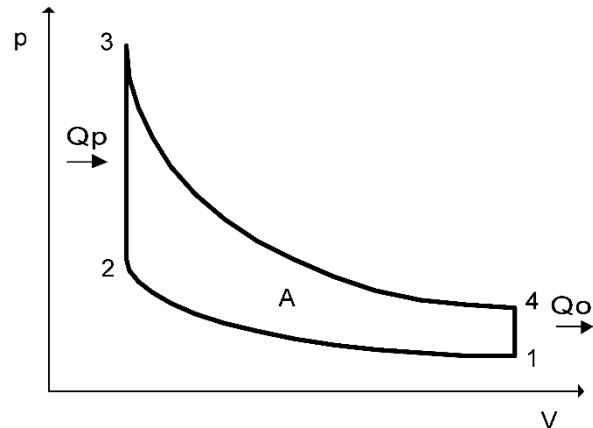
КПД цикла Дизеля

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{m^k - 1}{m - 1} \frac{1}{n^{k-1}}$$



Цикл Отто – термодинамический цикл, описывающий рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания с воспламенением

сжатой смеси от постороннего источника энергии, цикл бензинового двигателя. Назван в честь немецкого инженера Николауса Отто.

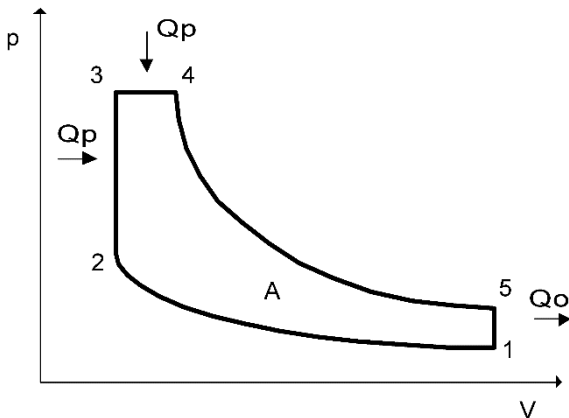


Идеальный цикл Отто
состоит из четырёх
процессов:
1-2 адиабатное сжатие
рабочего тела;
2-3 изохорный
подвод теплоты к рабочему телу;
3-4 адиабатное расширение
рабочего тела;
4-1 изохорное охлаждение
рабочего тела.

подвод теплоты к рабочему телу;

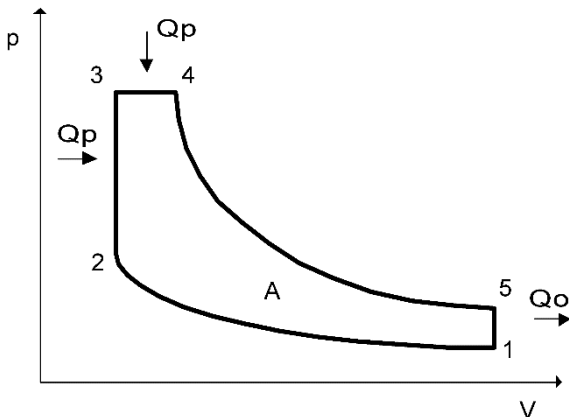
3-4 адиабатное расширение рабочего тела;

4-1 изохорное охлаждение рабочего тела.



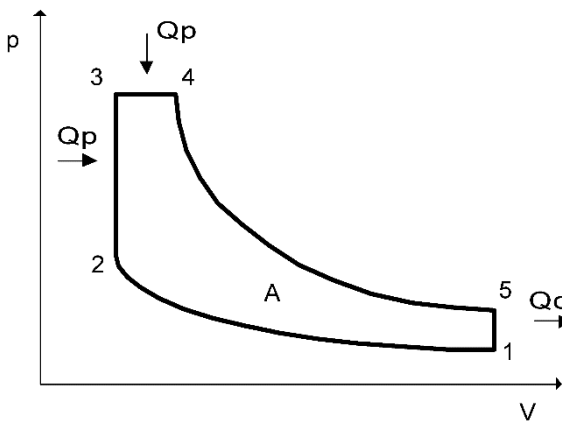
Цикл Тринклера –
термодинамический
цикл, описывающий
рабочий процесс
дизельного двигателя
со смешанным

сгоранием. Объединяет в себе цикл Отто и цикл Дизеля. Носит имя своего изобретателя Густава Тринклера.



Идеальный цикл
Тринклера состоит из
процессов:
1-2 В рабочем
цилиндре воздух
адиабатически

сжимается за счет инерции маховика, сидящего на валу двигателя, нагреваясь при этом до температуры, обеспечивающей воспламенение топливно-воздушной смеси.



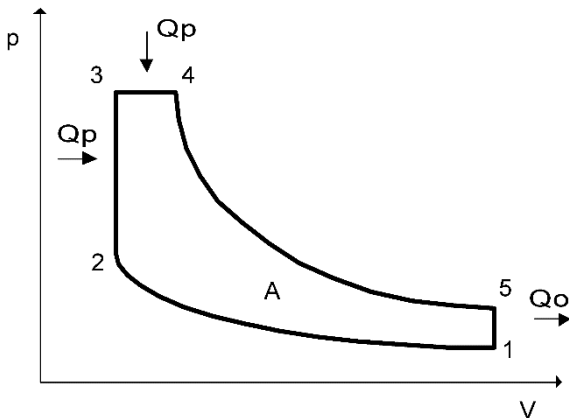
2-3 Сгорание части
топлива в небольшом
объеме форкамеры
($V=\text{const}$).

3-4 Догорание
оставшегося топлива

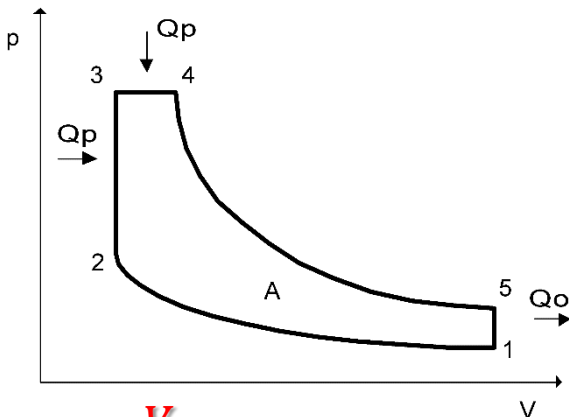
в рабочем цилиндре ($P=\text{const}$).

4-5 Адиабатическое расширение продуктов
сгорания.

5-1 Удаление выхлопных газов ($V=\text{const}$).



Жидкое топливо, введенное в форкамеру при сравнительно невысоком давлении, распыляется струей сжатого воздуха, поступающего из основного цилиндра. Вместе с тем цикл со смешанным сгоранием частично сохраняет преимущества цикла Дизеля перед циклом Отто – часть процесса сгорания осуществляется при постоянном давлении.



Термический КПД
цикла Тринклера

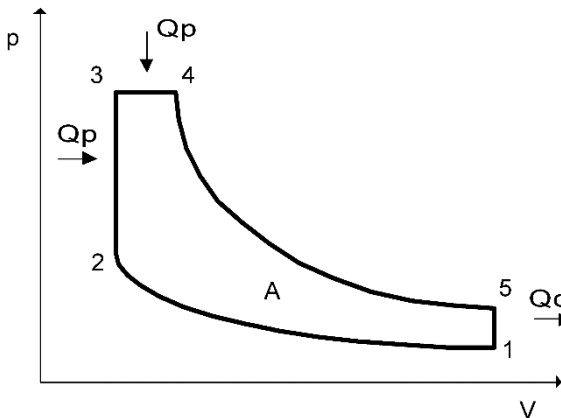
$$\eta = 1 - \frac{1}{n^{k-1}} \frac{\lambda m^{k-1}}{\lambda - 1 + k\lambda(m-1)},$$

где $n = \frac{V_1}{V_2}$ – степень
сжатия;

$m = \frac{V_4}{V_3}$ – степень предварительного расширения;

$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ – степень повышения давления при

изохорном процессе сгорания.



Частными случаями цикла Тринклера являются цикл Отто (при $m=1$) и цикл Дизеля (при $\lambda=1$).



Существует еще целый ряд менее распространенных термодинамических циклов, применяемых в различных тепловых машинах: *Цикл Хамфри* описывает рабочий процесс клапанного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя.

Цикл Стирлинга описывает рабочий процесс машины Стирлинга, запатентованной в 1816 г. шотландским изобретателем Робертом Стирлингом, приходским священником по профессии.



Цикл Миллера используется в четырёхтактных двигателях внутреннего сгорания.

Цикл Ленуара описывает рабочие процессы ряда двигателей внутреннего сгорания, имеющих разную конструкцию и область применения, в том числе:

- исторически первый работающий двигатель внутреннего сгорания, запатентованный в 1859 г. бельгийским изобретателем Жаном Жозефом Этьеном Ленуаром, в честь которого цикл и получил своё название;



- тепловые ракетные двигатели;
- бесклапанные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели;
- газотурбинные двигатели внутреннего сгорания, работающие без доступа атмосферного воздуха, на ракетном топливе, например, турбины двигателей торпед, турбонасосных агрегатов ЖРД, и др.

Цикл Аткинсона – модифицированный цикл Отто 4-тактного двигателя внутреннего сгорания.



И, наконец, *эталонный цикл Эдвардса* – термодинамический цикл, устанавливающий предел тепловой экономичности для двигателей, источником энергии которых служит топливо, а тепловым стоком – окружающая среда.

Однако для нас, как для энергетиков, наибольший интерес представляет *цикл Ренкина*, использующий двухфазное рабочее тело, включающий испарение и конденсацию. Именно на этом цикле работают паротурбинные установки тепловых и атомных электростанций.



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 .

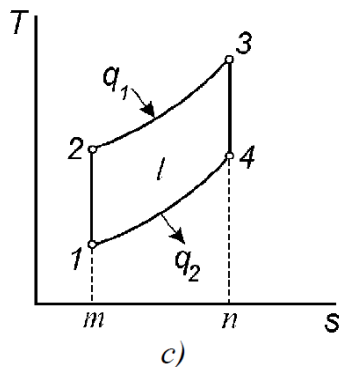
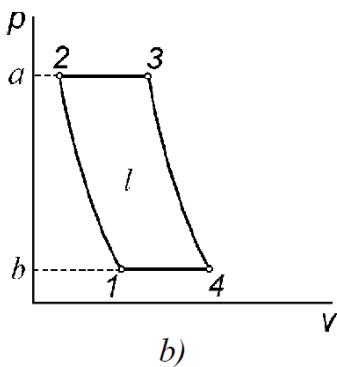
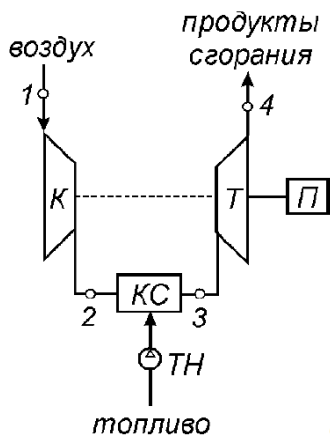


Газотурбинная установка – тепловой двигатель, рабочее тело в котором остается газообразным во всех точках теплового цикла, и состоящий из турбины, компрессора, устройства подвода и отвода теплоты, объединенных общей гидромеханической системой.



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 pv -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 Ts -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:

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



Согласно данной формуле термический КПД растёт 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 $t_3 = (700 \div 800)^\circ\text{C}$, что соответствует значениям $\beta = (4 \div 6)$.

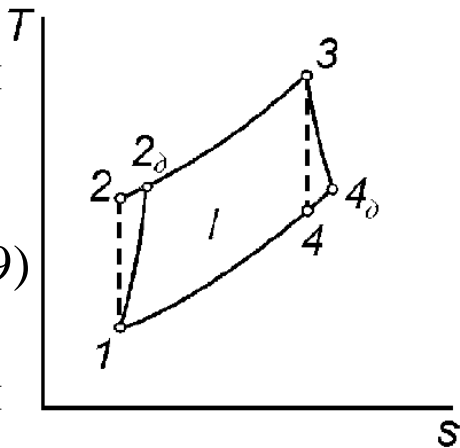


Затрачиваемая работа в
процессе 1–2_д (внутренняя
работа компрессора)
вычисляется по формуле

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

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

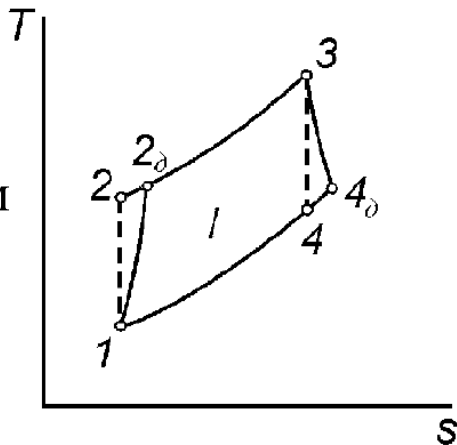
$$l_i^T = h_3 - h_{4_d} \quad (10)$$





Степень необратимости
процесса сжатия $1-2_{\partial}$
характеризуется
внутренним относительным
КПД компрессора

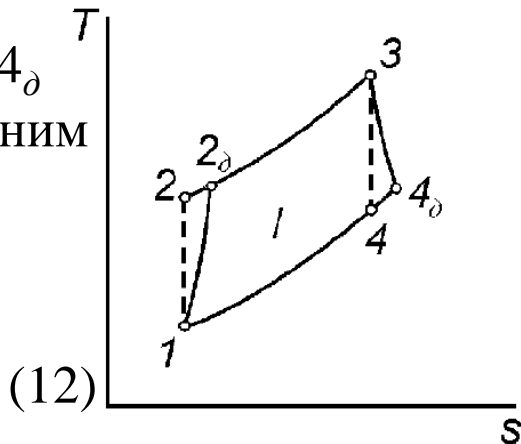
$$\eta_{oi}^K = \frac{h_2 - h_1}{h_{2_{\partial}} - h_1} \quad (11)$$





Степень необратимости
процесса расширения $3-4_{\partial}$
характеризуется внутренним
относительным КПД
турбины

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





Работу действительного цикла называют внутренней работой цикла

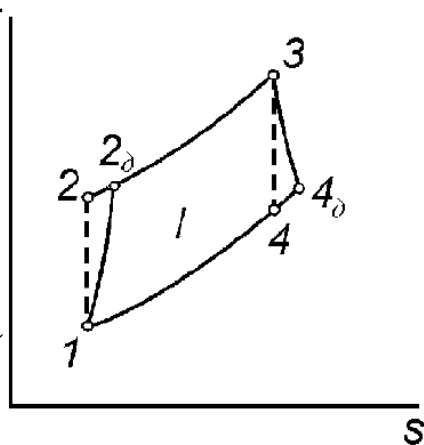
$$l_i = l_i^T - l_i^K \quad (13)$$

Теплота, подводимая в действительном цикле, равна

$$q_{1_0} = h_3 - h_{2_0} \quad (14)$$

Отводимая теплота в действительном цикле равна

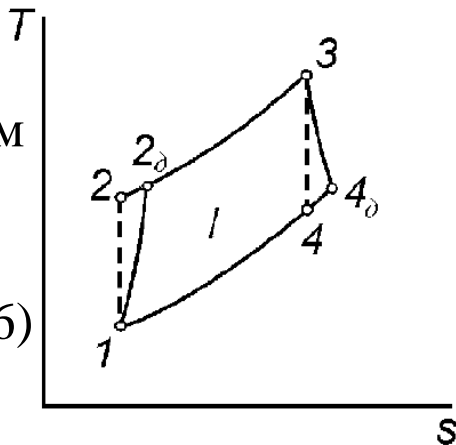
$$q_{2_0} = h_{4_0} - h_1 \quad (15)$$





Эффективность
действительного цикла
характеризуется внутренним
КПД, определяемым по
формуле

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





Внутренний КПД цикла учитывает потери от необратимости процессов сжатия и расширения, а также потери тепла, уносимые с отработавшими газами $q_{2\partial}$. 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

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



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 η_M^K и турбины η_M^T .



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;

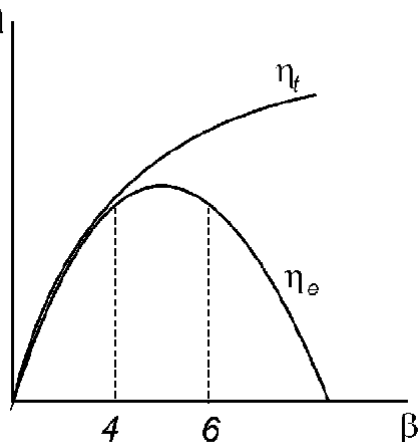
Q_H^p – теплота сгорания топлива.



Термический и эффективный КПД цикла ГТД зависят от степени повышения давления воздуха в компрессоре

Оптимальный диапазон значений β , при которых η_e имеет максимум, составляет

$(4 \div 6)$. 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 $\eta_e = (17 \div 20) \%$.





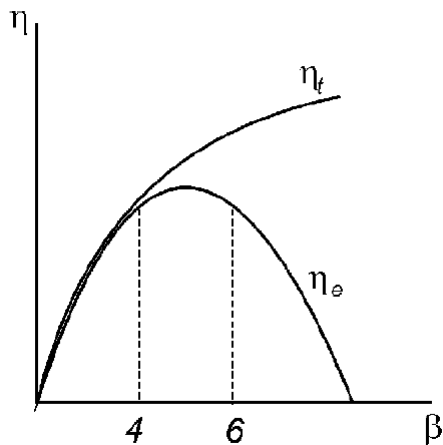
С помощью КПД можно
рассчитать составляющие
уравнения теплового баланса
ГТД

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

где

$q_{пот}^{КС}$ – потери тепла в камере
сгорания,

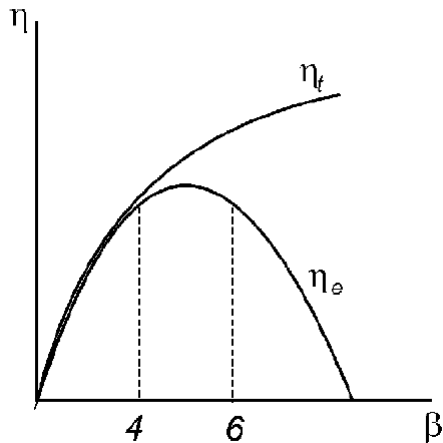
$q_{пот}^{дг}$ – потери тепла с уходящими дымовыми
газами,





$l_{\text{пот}}^K$ — механические
потери в компрессоре,

$l_{\text{пот}}^K$ — механические потери в
турбине.





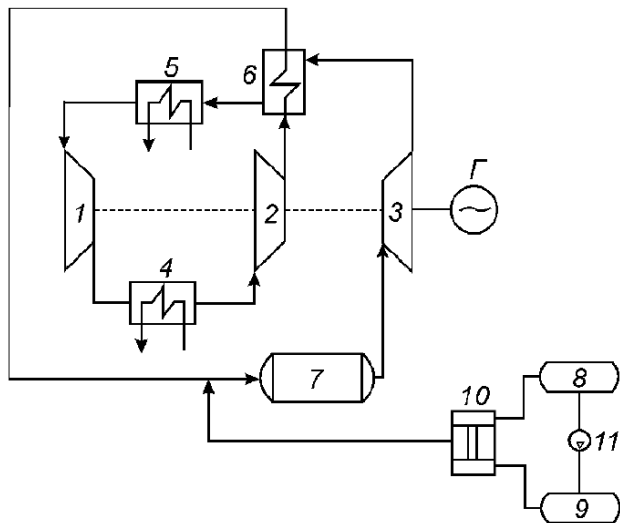
Для повышения тепловой экономичности ГТУ, используемых для привода различных механизмов, применяются:

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

В результате эффективный КПД ГТУ достигает 35 %.



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.



Принципиальная схема ГТУ
замкнутого цикла

- 1 – КНД; 2 – КВД;
- 3 – газовая турбина;
- 4, 5 – охладители газа;
- 6 – регенератор;
- 7 – активная зона ядерного реактора (нагреватель газа);
- 8 – газгольдер низкого давления;
- 9 – газгольдер высокого давления;
- 10 – управляющий клапан;
- 11 – перекачивающий компрессор.



ГТУ замкнутого цикла состоит из газового компрессора 1, 2, турбины 3, регенератора 6, газоохладителей 4 и 5. Подвод теплоты производится в активной зоне 7.

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.