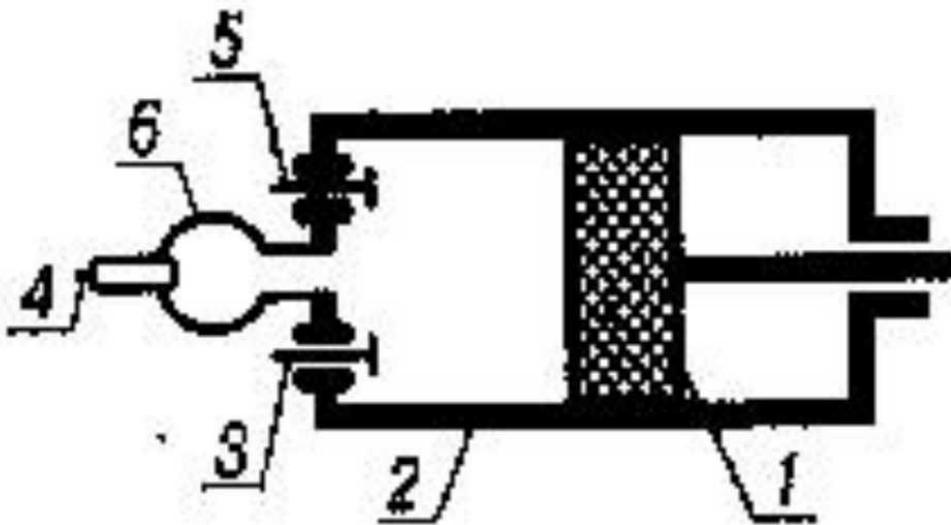


ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

ЦИКЛЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Цикл со смешанным подводом теплоты

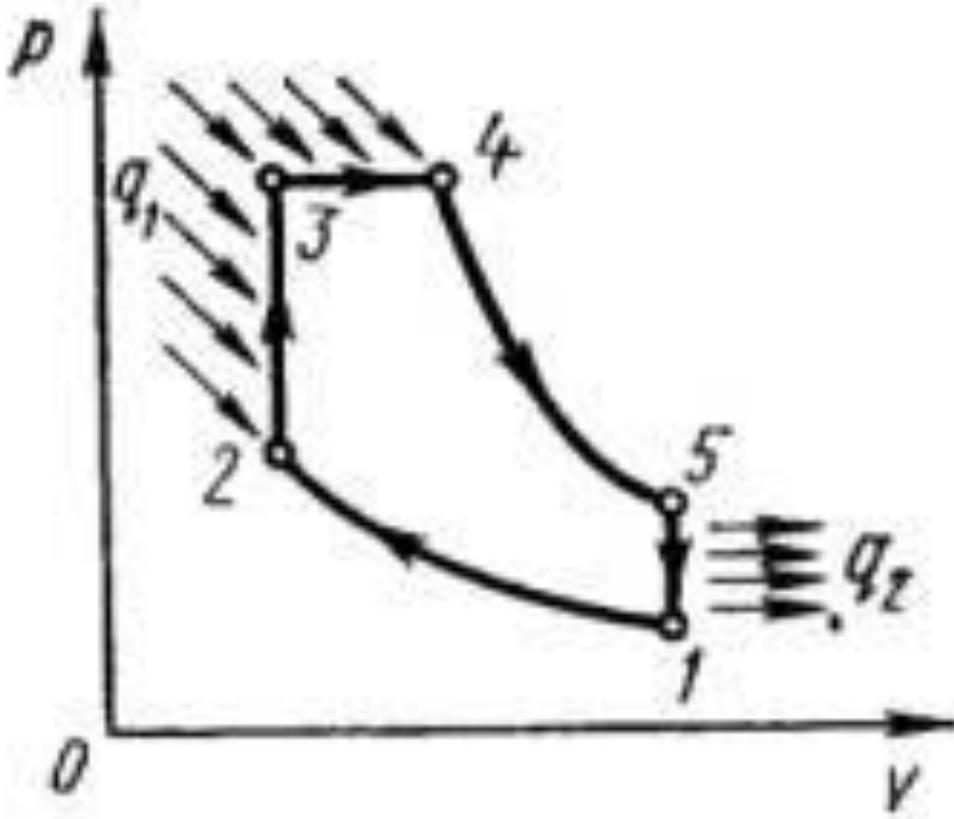
Данный цикл реализуется в бескомпрессорных дизелях с предварительным распылением топлива, внутренним смесеобразованием и самовоспламенением от сжатого в цилиндре **2** до высокой температуры воздуха. Топливо под давлением (30 - 40 МПа) через форсунку **4** подается в предкамеру **6**, где происходит быстрое сгорание при постоянном объеме. Окончательное догорание смеси происходит в цилиндре.



**Схема бескомпрессорного
дизеля**

1 - поршень; 2 - цилиндр;
3, 5 - клапаны; 4 -
форсунка; 6 - предкамера

Цикл со смешанным подводом теплоты



1 - 2 Адиабатическое сжатие воздуха

2 - 3 Изохорный подвод теплоты (q_1 - быстрое сгорание топлива в предкамере)

3 - 4 Изобарный подвод теплоты (горение рабочей смеси в цилиндре)

4 - 5 Адиабатное расширение продуктов сгорания

5 - 6 Изохорный отвод теплоты q_2 (выпуск газов)

Цикл со смешанным подводом теплоты

Определим КПД цикла Тринклера:

$$\eta_t^T = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_V (T_5 - T_1)}{C_V (T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3)}$$

T_1, T_2 - температура воздуха, поступающего в двигатель,
 T_3, T_4, T_5 - температура газов после сгорания топлива и на выходе из двигателя.

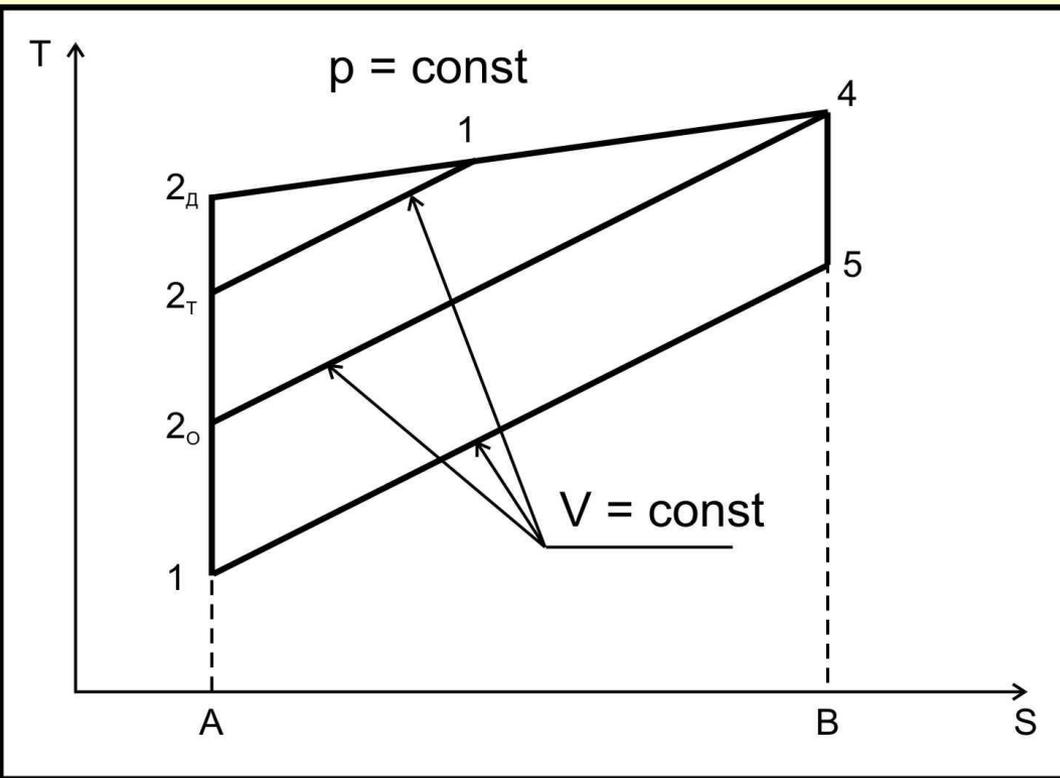
Если принять $T_4 = T_3$, то получим КПД для цикла Отто

$$\eta_t^O = 1 - \frac{C_V (T_5 - T_1)}{C_V (T_3 - T_2)}$$

Цикл со смешанным подводом теплоты

Если принять $T_2 = T_3$, то получим КПД для цикла Дизеля

$$\eta_t^D = 1 - \frac{C_V (T_5 - T_1)}{C_P (T_4 - T_3)}$$



Сравним рассмотренные циклы при одинаковых конечных давлениях и температурах и неизменном количестве отведенной теплоты. При одинаковых средних температурах отвода теплоты T_x^{cp} средняя температура отвода теплоты $T_{гД}^{cp}$ в цикле Дизеля выше, чем в цикле Тринклера, а в цикле Отто ниже, чем в цикле Тринклера.

$$T_{гД}^{cp} > T_{гТ}^{cp} > T_{гО}^{cp}$$

Цикл со смешанным подводом теплоты

Учитывая, что средняя температура отвода теплоты в циклах одинакова, из

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

получим соотношение их термодинамических КПД

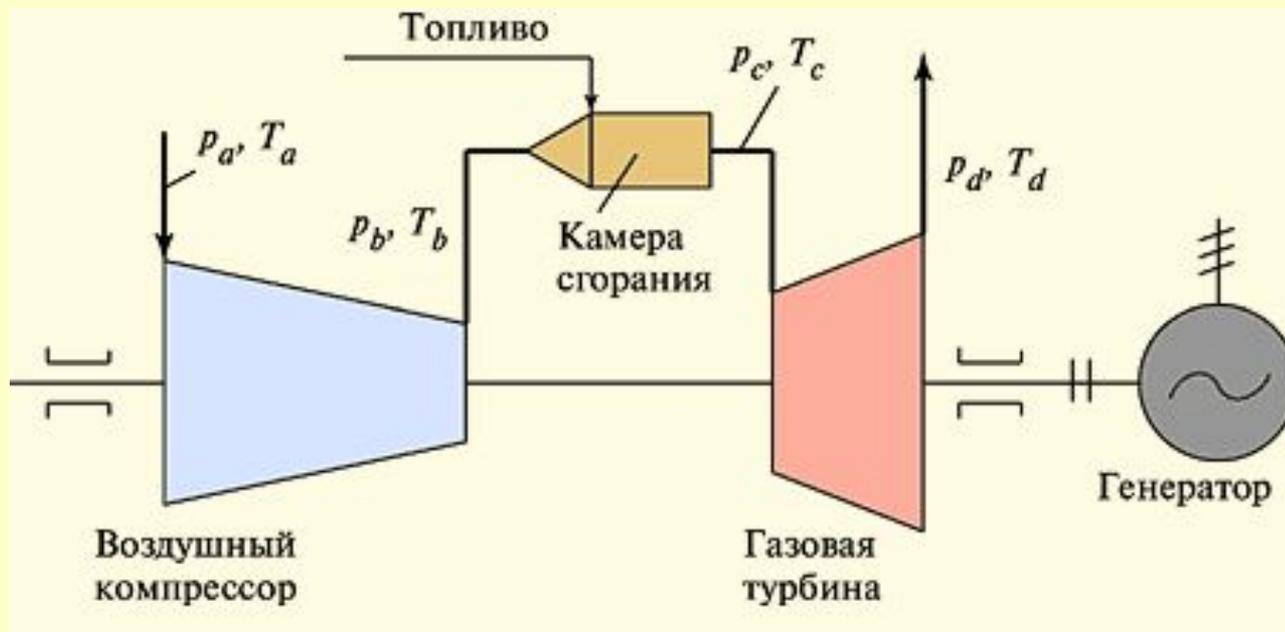
$$\eta_t^D > \eta_t^T > \eta_t^O$$

Таким образом, цикл Тринклера занимает промежуточное значение между циклами Отто и Дизеля.

Реальные циклы ДВС отличаются от рассмотренных теоретических циклов неидеальностью рабочего тела, изменением его количества, необратимостью процессов цикла, и т.д.

Циклы газотурбинных установок (ГТУ)

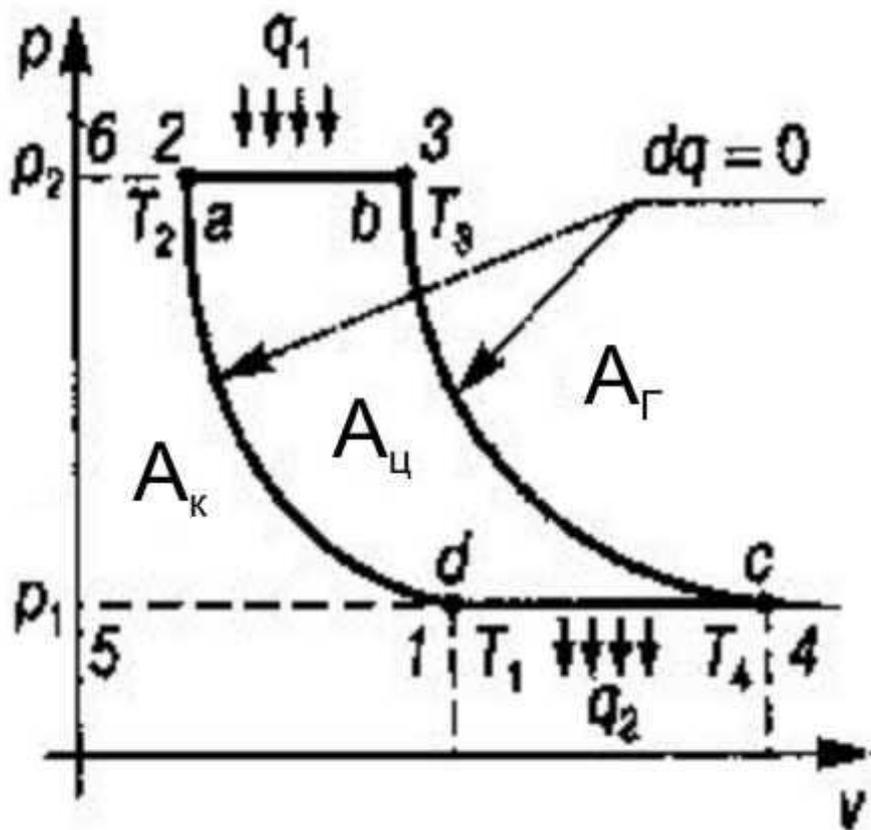
Преобразование теплоты в работу осуществляется в нескольких агрегатах ГТУ.



Воздушный компрессор сжимает атмосферный воздух, повышая его давление, и непрерывно подает его в камеру сгорания. Туда же топливным насосом непрерывно подается жидкое или газообразное топливо

Циклы газотурбинных установок (ГТУ)

Образующиеся в камере продукты сгорания выходят из нее через сопловой аппарат с повышенной температурой и почти тем же давлением, что и на выходе из компрессора. **Горение топлива происходит при постоянном давлении.**



В газовой турбине **продукты сгорания адиабатно расширяются**, в результате чего их температура снижается, **а давление уменьшается до атмосферного.**

Циклы газотурбинных установок (ГТУ)

Перепад давлений $p_3 - p_1$ используется для получения технической работы в турбине $A_{\text{тех}}$. Большая часть этой работы $A_{\text{к}}$ расходуется на привод компрессора; **разность $A_{\text{тех}} - A_{\text{к}}$ является полезной.**

Заменим сгорание топлива подводом изобарным теплоты, а охлаждение - изобарным отводом теплоты.

1 - 2 Сжатие рабочего тела от атмосферного до давления в двигателе

2 - 3 Горение в камере

3 - 4 Процесс адиабатного расширения рабочего тела

4 - 1 Отработанные газы выбрасываются в атмосферу

Полезная работа $A_{\text{ц}}$ - площадь, заключенная в контуре цикла (1-2-3-4) - разность между технической работой, полученной в турбине и работой, затраченной на привод компрессора

Циклы газотурбинных установок (ГТУ)

КПД ГТУ:
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 (T_3 / T_2 - 1)}$$

считаем $C_p = \text{const}$

Введем степень повышения давления в компрессоре:

$$\pi = p_2 / p_1$$

Выразим отношение температур через степень повышения давления из уравнения адиабаты:

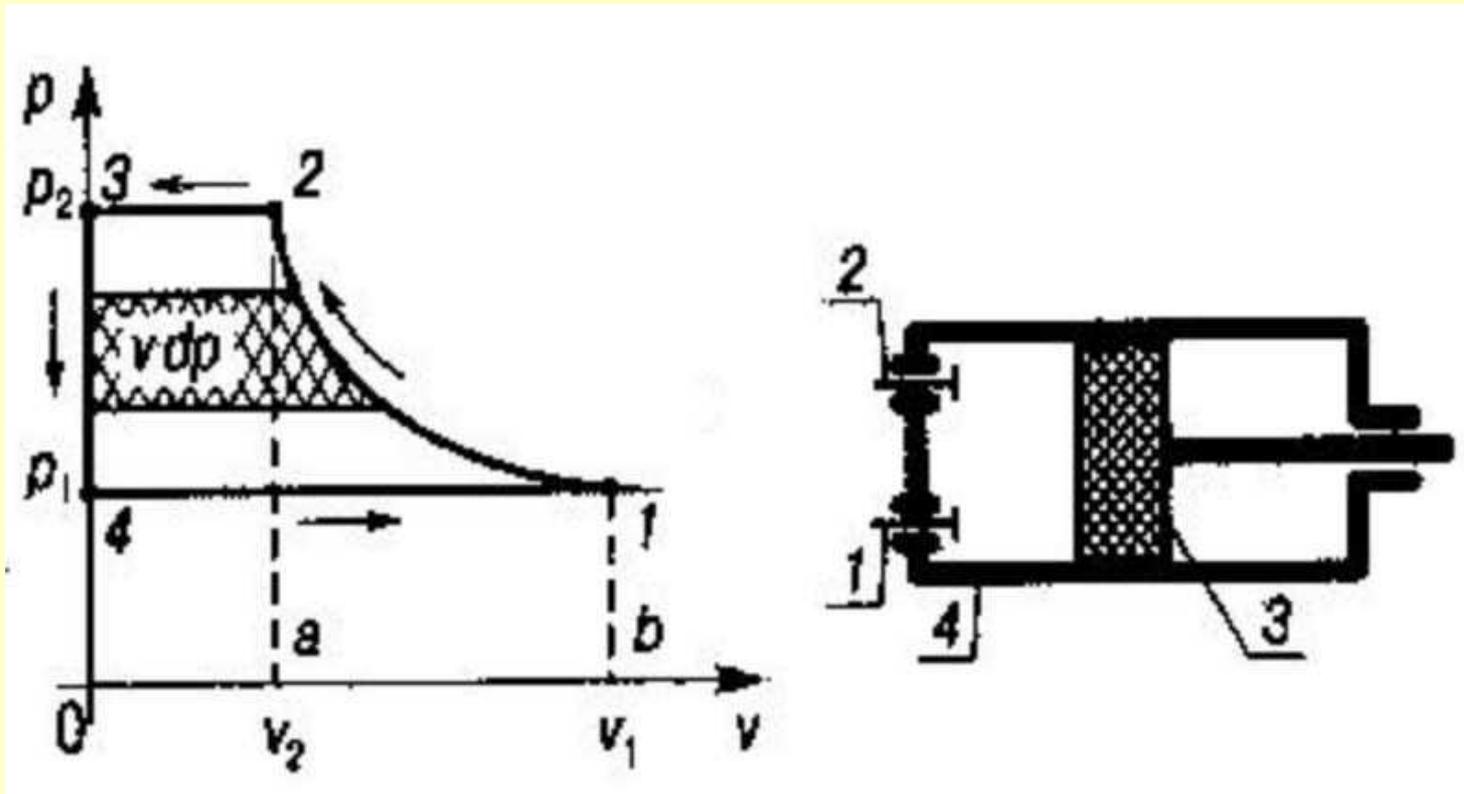
$$p_1^{k-1} T_1^k = p_2^{k-1} T_2^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1-k}{k}} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

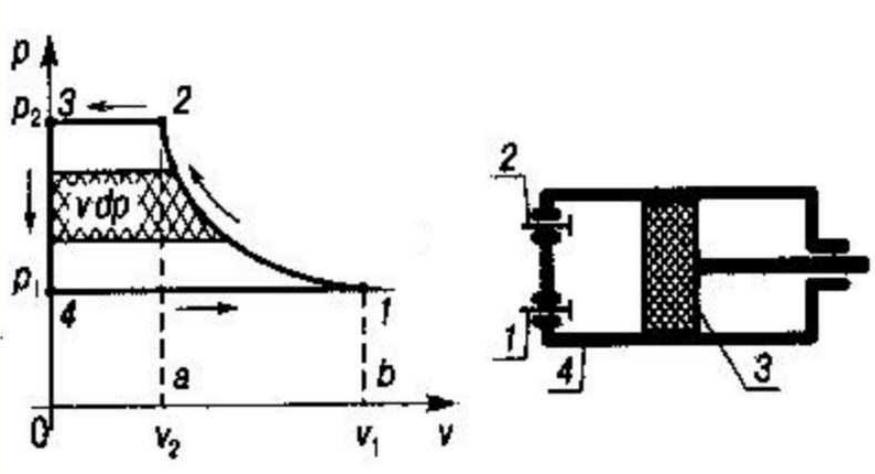
Процессы в компрессионных машинах

К компрессионным машинам относятся компрессоры, вентиляторы и насосы. В отличие от вентиляторов компрессоры и насосы предназначены для создания более высоких давлений



PV - диаграмма и схема поршневого компрессора

Процессы в компрессионных машинах



Рассмотрим процессы, протекающие в идеальном поршневом компрессоре, не имеющем вредного пространства (в крайнем положении поршень 3 касается цилиндра 4 без зазора), и при отсутствии трения и потерь работы

При движении поршня 3 слева направо через всасывающий клапан 2 происходит заполнение цилиндра газом (4 - 1).

При закрытых клапанах 1 и 2 и движении поршня справа налево происходит сжатие газа от p_1 до p_2 (линия 1 - 2). Точка 2 - открытие нагнетательного клапана 1 - газ выталкивается в резервуар высокого давления (линия 2 - 3). Далее клапан 1 закрывается и процесс повторяется

Процессы в компрессионных машинах

Работ на сжатие 1 кг газа в компрессоре определяется суммой работы A_{1-2} , затраченной на сжатие газа, работы выталкивания A_{2-3} и работа всасывания A_{4-1} .

$$A_k = A_{1-2} + A_{2-3} + A_{4-1}$$

В процессе выталкивания давление $p_2 = \text{const}$, а объем изменяется от V_2 до $V_3 = 0$. Тогда:

$$A_{2-3} = \int_{V_2}^{V_3} p dV = p_2 (V_3 - V_2) = -p_2 V_2$$

Процесс всасывания происходит при $p_1 = \text{const}$ от объема $V_4 = 0$ до объема V_1 .

$$A_{4-1} = \int_{V_4}^{V_1} p dV = p_1 \int_{V_4}^{V_1} dV = p_1 V_1$$

Процессы в компрессионных машинах

В результате получаем:

$$A_k = \int_{V_1}^{V_2} p dV - p_2 V_2 + p_1 V_1$$

С другой стороны, работа компрессора есть техническая работа A_0 , совершаемая над рабочим телом

$$A_k = -A_0 = -\left(-\int_{p_1}^{p_2} V dp\right) = \int_{p_1}^{p_2} V dp$$

Работа A_k зависит от характера процесса сжатия. **В общем случае сжатие в компрессоре является политропным**, и с учетом $V = V_1(p_1/p)^{1/n}$ можно получить:

$$A_k = \int_{p_1}^{p_2} V dp = \int_{p_1}^{p_2} V_1 (p_1 / p)^{1/n} dp = V_1 p_1^{1/n} \int_{p_1}^{p_2} p^{-1/n} dp =$$

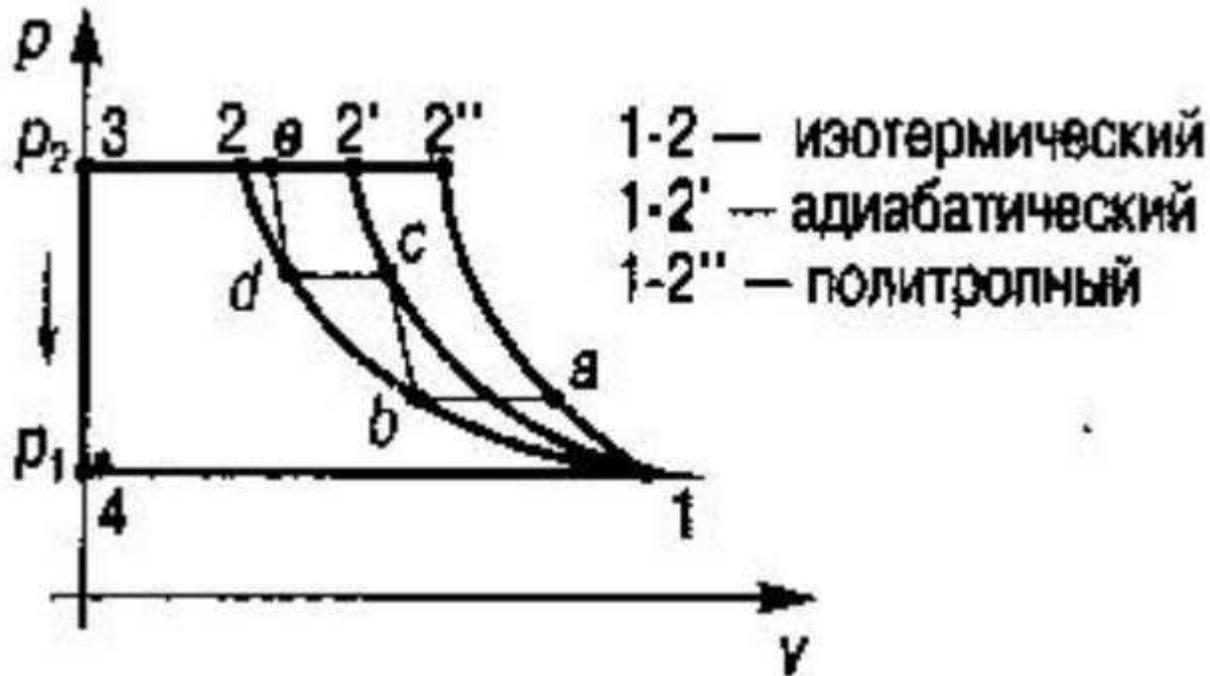
Процессы в компрессионных машинах

$$= \frac{V_1 p_1^{1/n} n}{n-1} \left(p^{\frac{n-1}{n}} \right) \Big|_{p_1}^{p_2} = \frac{n}{n-1} V_1 p_1^{1/n} \left(p_2^{\frac{n-1}{n}} - p_1^{\frac{n-1}{n}} \right) = \frac{n p_1 V_1}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Если происходит **изотермическое сжатие при $n = 1$** , то:

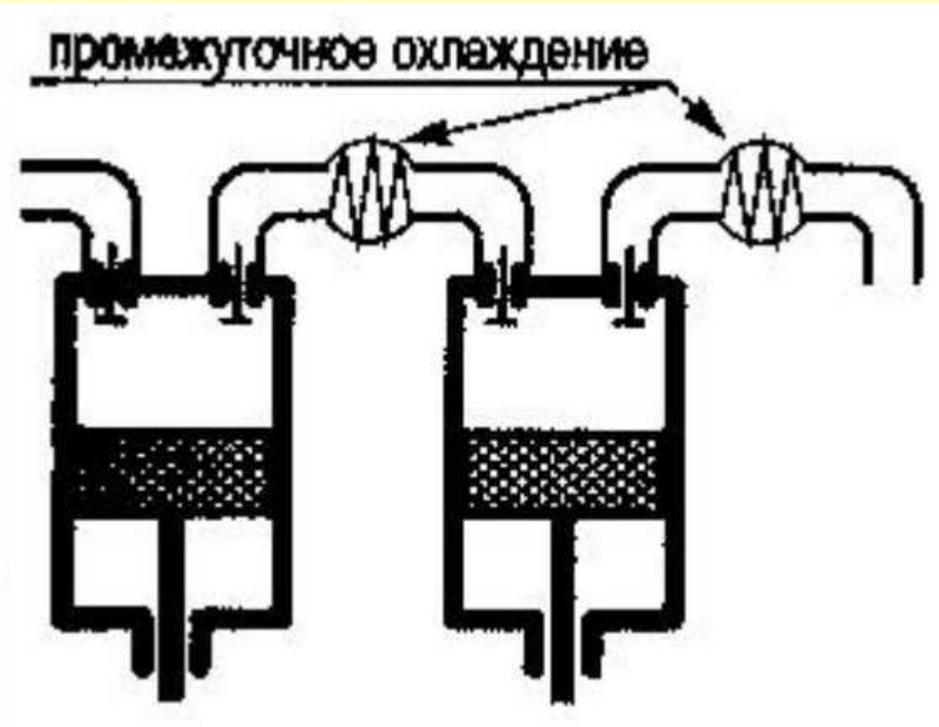
$$A_k = \int_{p_1}^{p_2} V dp = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1^n}{V^n} dV = p_1 V_1^n \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Процессы сжатия в поршневом компрессоре



Минимальную техническую работу для сжатия газа от давления p_1 до p_2 требуется затратить при изотермическом процессе. Но при этом, в соответствии с первым законом термодинамики, от сжимаемого газа должна отводиться теплота, эквивалентная затрачиваемой работе

Процессы сжатия в поршневом компрессоре



Приближение процесса сжатия в компрессоре к изотермическому имеет не только термодинамическое, но и эксплуатационное значение. При сжатии по адиабате или политропе в конце сжатия повышается температура газа, что может вызвать неполадки.

Схема многоступенчатого компрессора

Для приближения процесса к изотермическому создаются многоступенчатые компрессоры. Сжатие газа осуществляется последовательно в несколько ступеней с промежуточным изобарным охлаждением (линия 1-a-b-c-d-e)

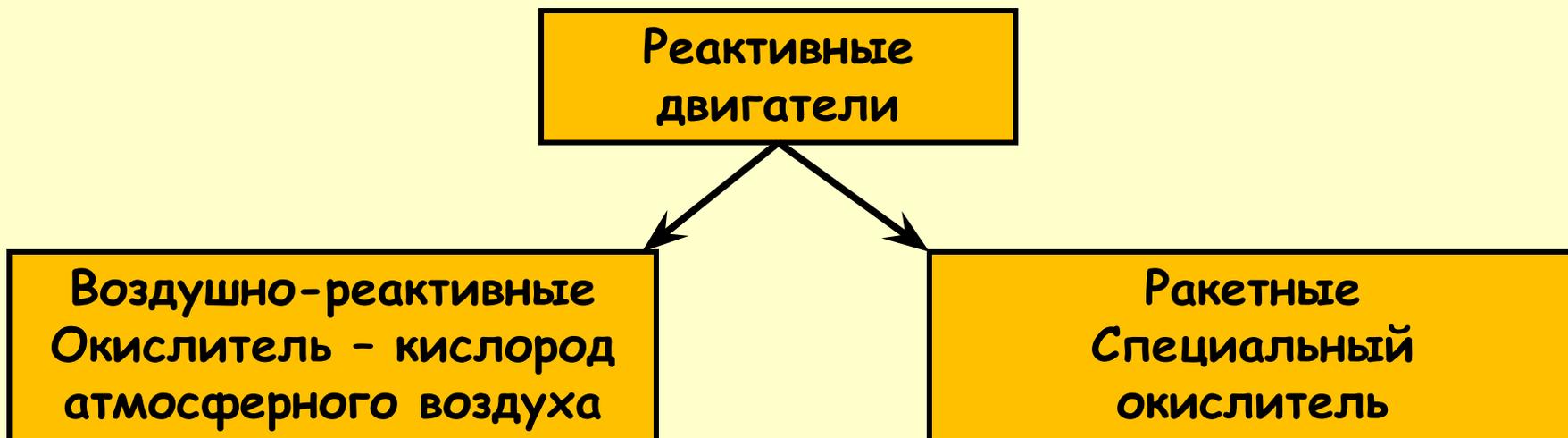
Циклы реактивных двигателей

Преобразование теплоты в работу: рабочее тело (газ) получают в камере сгорания путем сжигания топлива; газ пропускают через сопло, где происходит его расширение и разгон, при этом теплота переходит в кинетическую энергию потока газа.

Сила тяги $P = G W_{эф}$

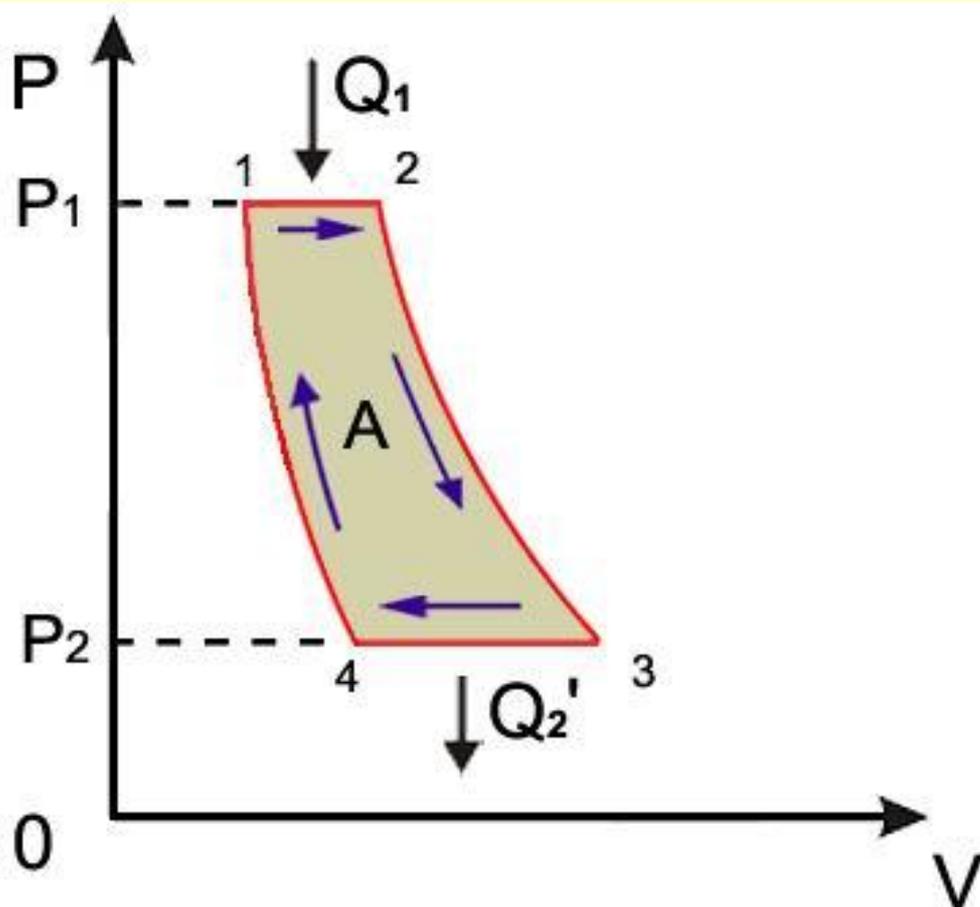
G - массовый секундный расход продуктов сгорания

$W_{эф}$ - эффективная скорость истечения



Реактивный двигатель

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД) обычно устанавливаются на летательные аппараты.



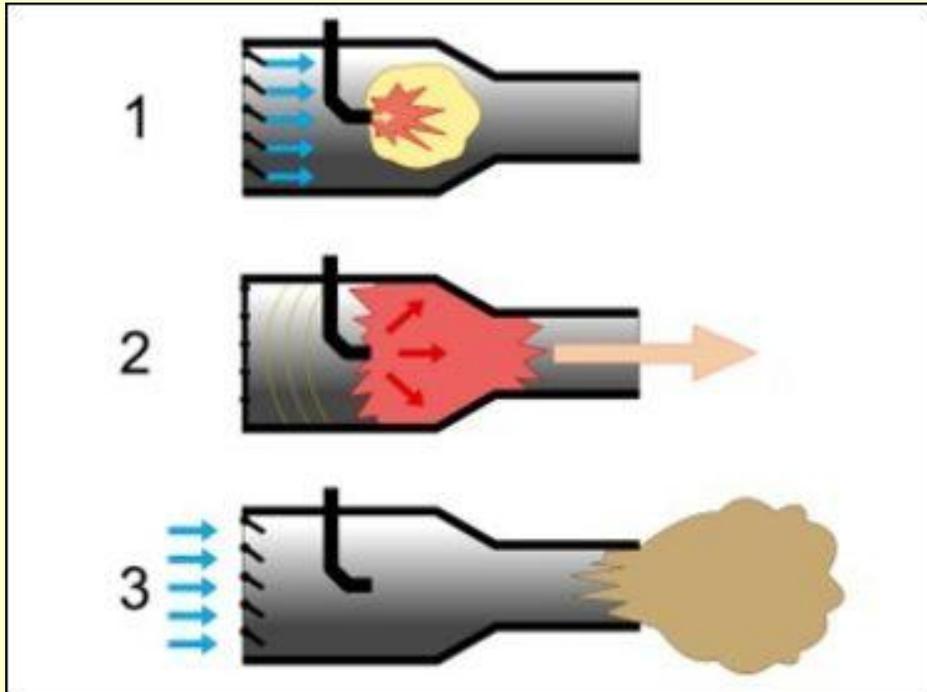
1 - 2 Адиабатическое сжатие набегающего потока воздуха в диффузоре

2 - 3 Подвод теплоты при сгорании топлива

3 - 4 Адиабатическое расширение продуктов сгорания в сопле

4 - 1 Адиабатическое охлаждение удаленных в атмосферу продуктов сгорания до температуры окружающей среды

Реактивный двигатель



Встречный поток воздуха тормозится, в результате чего уменьшается его скорость и повышается давление.

Торможение начинается до входа в двигатель и продолжается во входном устройстве - диффузоре. Сжатый в диффузоре воздух поступает в камеру сгорания, в которую через форсунки впрыскивают топливо.

Воспламенение осуществляется электроискрой. Температура на выходе из камеры может достигать более 2000 °С. У **прямоточный ВРД** давление в процессе меняется не значительно, поэтому их принято относить к типу двигателей, использующих цикл с подводом топлива при $p = \text{const}$.

Реактивный двигатель

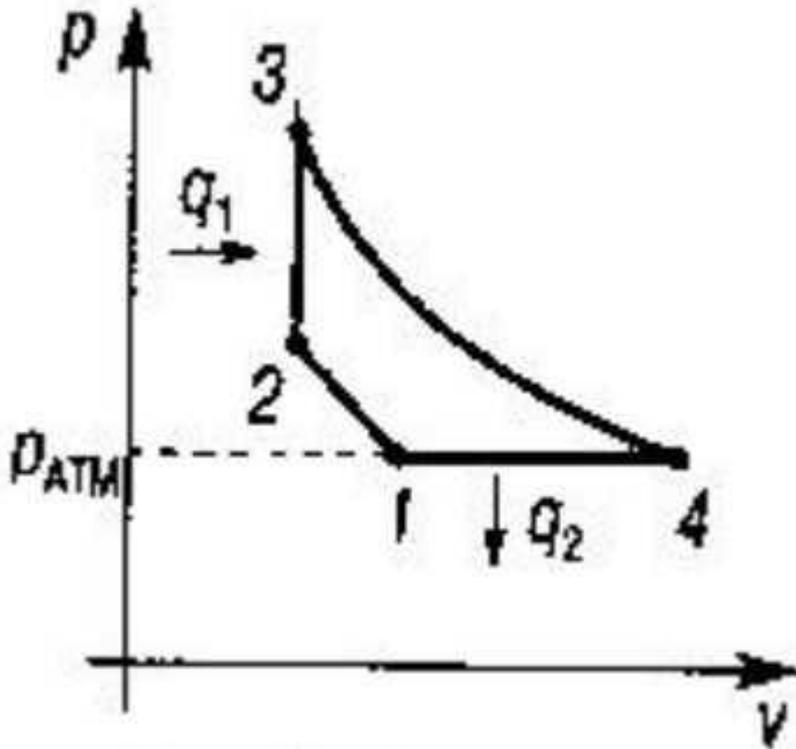
КПД такого цикла:
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

При скоростях порядка 900 - 1000 км/час степень сжатия воздуха в диффузоре невелика и $\eta = 3 - 4 \%$

ВРД, в котором сгорание топлива происходит при $V = \text{const}$, называют пульсирующим

Этот тип ВРД отличается наличием распределительного клапанного устройства, при помощи которого можно в требуемый момент разобцить камеру сгорания и диффузор.

Реактивный двигатель



1 - 2 адиабатическое сжатие воздуха в диффузоре

2 - 3 изохорический подвод тепла к рабочему телу при сгорании топлива

3 - 4 адиабатический процесс расширения в сопле

4 - 1 выброс в атмосферу продуктов сгорания

В состоянии 2 камера сгорания разобщается с диффузором путем закрытия клапана, и топливо воспламеняется

Реактивный двигатель

Цикл пульсирующего ВРД с подводом теплоты при $V = \text{const}$ не отличается от цикла ГТУ с изохорическим сгоранием топлива, поэтому его термический КПД:

$$\eta_t = \frac{1 - k(\lambda^{1/k} - 1)}{\beta^{(k-1)/k} (\lambda - 1)}$$

Где $\beta = p_2/p_1$ - степень увеличения давления, $\lambda = p_3/p_2$ - степень добавочного увеличения давления

Компрессорный турбореактивный двигатель

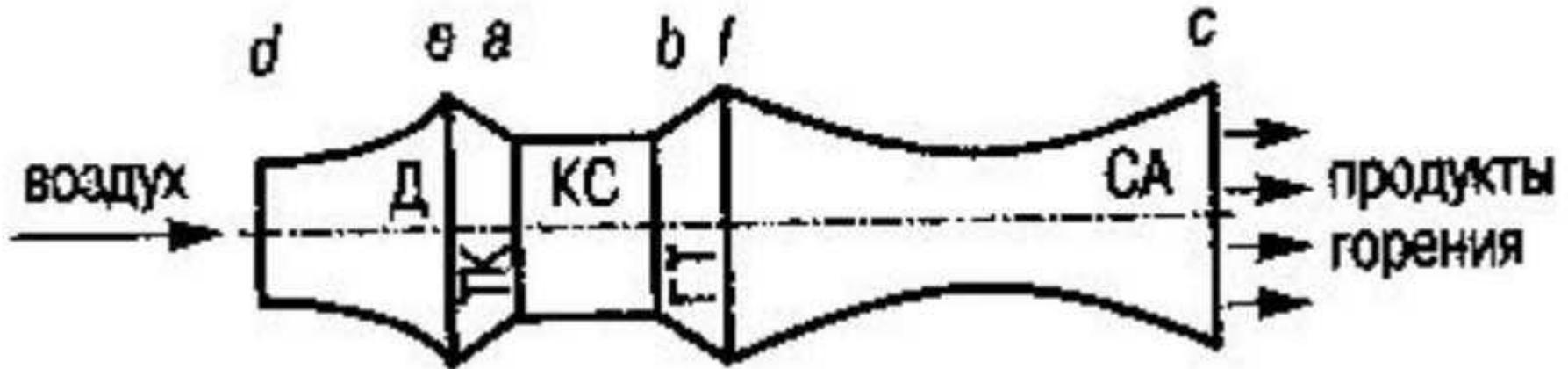


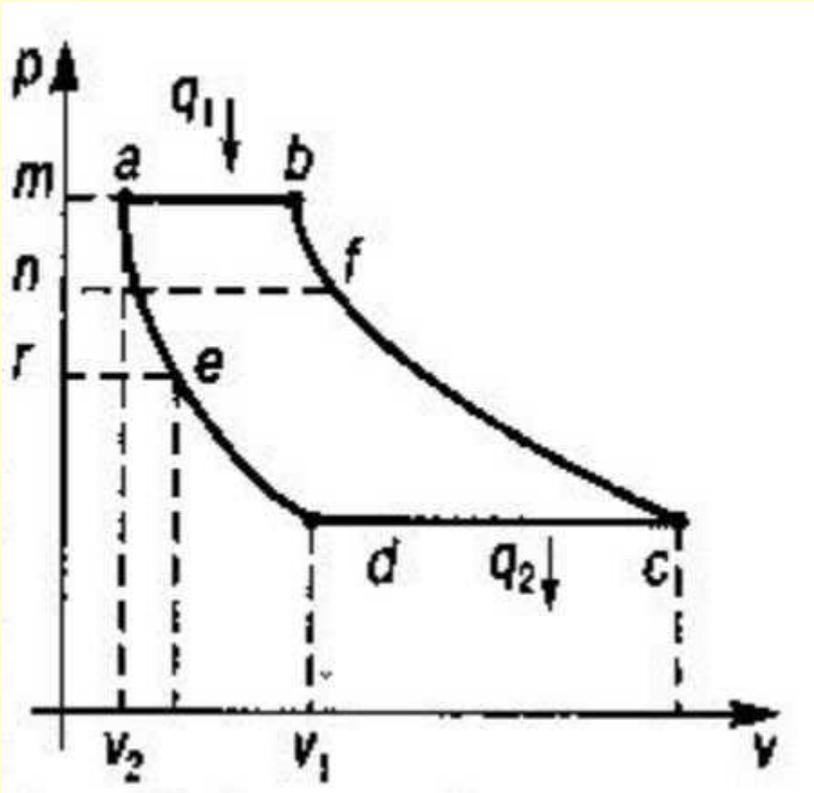
Схема компрессорного турбореактивного двигателя

Д - диффузор, ТК - турбокомпрессор, КС - камера сгорания, ГТ - газовая турбина, СА - сопло.

Процесс сжатия осуществляется в два этапа:

1. Сначала в диффузоре (d-e)
2. Затем в турбокомпрессоре (e-a)

Компрессорный турбореактивный двигатель



Работа, затрачиваемая на привод компрессора, численно равна S_{eamr} . Привод компрессора осуществляется от газовой турбины, работа которой численно равна S_{bfm} . Данные площади должны быть равны. Процесс подвода теплоты a-b происходит в КС. Процесс расширения продуктов сгорания b-c происходит сначала в ГТ (b-f), а затем в сопловом аппарате. c-d - охлаждение продуктов сгорания в атмосфере.

Подведенная теплота в двигателе расходуется в двух направлениях: на привод компрессора S_{bfm} и на создание реактивной силы S_{fcdn}

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

Жидкостный реактивный двигатель

ЖРД - двигатель, в котором сила тяги возникает при истечении из сопла продуктов сгорания жидкого топлива.

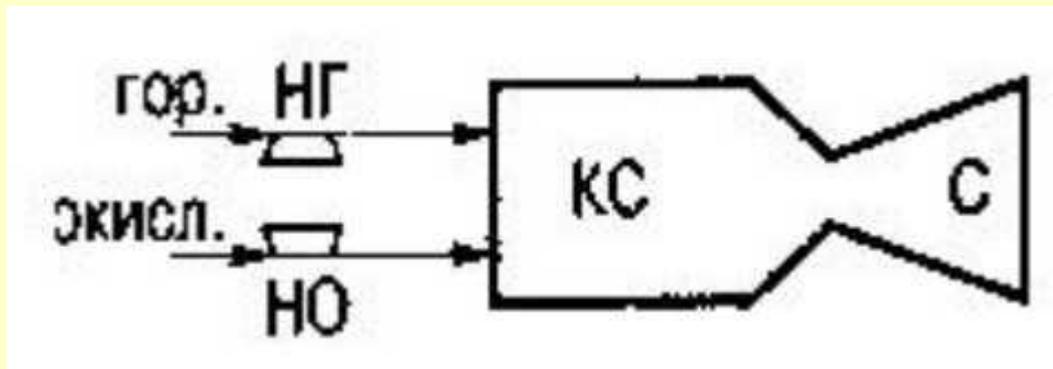
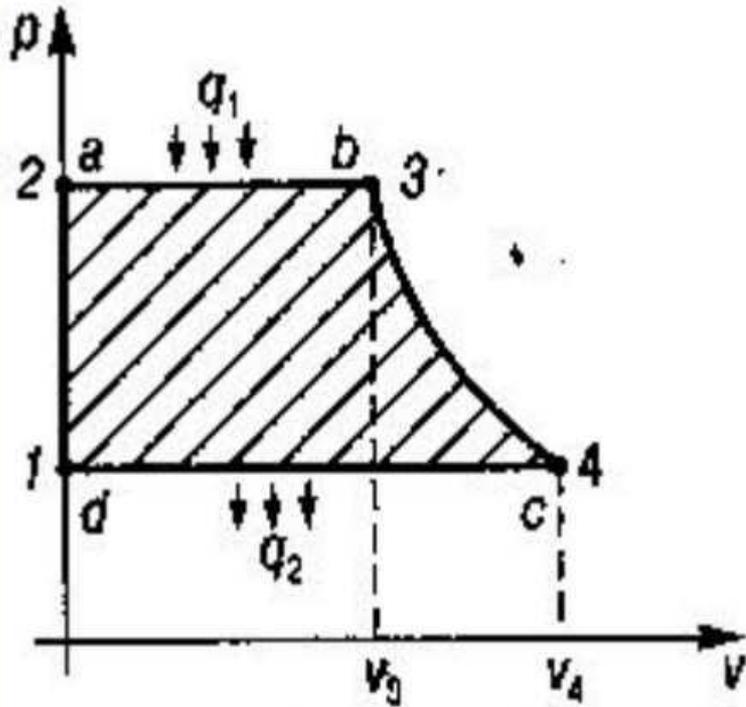


Схема жидкостного реактивного двигателя

НО - насос окислителя, НГ - насос горючего, КС - камера сгорания

Ввиду малого объема жидкости по сравнению с объемом продуктов сгорания и малой сжимаемостью жидкости, процесс сжатия можно считать изохорным

Жидкостный реактивный двигатель



1 - 2 Изохорное сжатие

2 - 3 Подвод теплоты (сгорание топлива) при $p = \text{const}$

3 - 4 Расширение продуктов сгорания в сопле

4 - 1 Охлаждение продуктов сгорания в атмосфере