

- 1) невозможность осуществления в цилиндре полного адиабатного расширения продуктов сгорания до атмосферного давления, ( теряется полезная работа);
- 2) наличие частей с возвратно-поступательным движением приводит к неизбежной неравномерности работы, что делает невозможным повышение быстроходности двигателя и сосредоточение больших мощностей в одном агрегате при умеренном габарите и сравнительно небольшой массе.



Тепло

Техника

Газотурбинные  
установки (ГТУ)

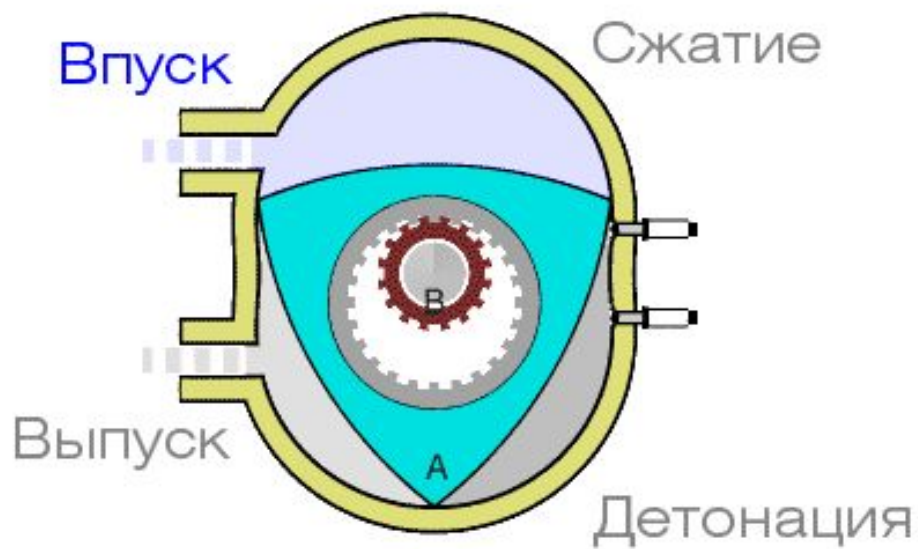
Недостатки, присущие поршневым ДВС, устраняются в ротационных двигателях внутреннего сгорания, или газотурбинных установках.

Особенностью роторно-поршневого двигателя (двигателя Ванкеля) является применение трёхгранного ротора (поршня), имеющего вид треугольника Рело, вращающегося внутри цилиндра специального профиля, поверхность которого выполнена по эпитрохоиде.

# Тепло

# Техника

## Роторно-поршневой двигатель





# Тепло

# Техника

## Роторно-поршневой двигатель

За счёт отсутствия преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное, двигатель Ванкеля способен выдерживать гораздо большие обороты по сравнению с традиционными двигателями. Роторно-поршневые двигатели обладают более высокой мощностью при небольшом объёме камеры сгорания, сама же конструкция двигателя сравнительно мала и содержит меньше деталей.



### Недостатки

Соединение ротора с выходным валом через эксцентриковый механизм, вызывает давление между трущимися поверхностями, что в сочетании с высокой температурой приводит к дополнительному износу и нагреву двигателя.

# Тепло

# Техника

## Газотурбинные установки (ГТУ)

В настоящее время ГТУ используются в качестве транспортных двигателей (авиационных, судовых и железнодорожных), маневренных энергетических установок мощностью до 200МВт.

ГТУ классифицируются по способу сжигания топлива: ГТУ со сгоранием при  $p = \text{const}$  и со сгоранием при  $v = \text{const}$ .

Однако последние ГТУ не получили широкого распространения,

во-первых, из-за неэкономичной работы турбины, из-за изменения во времени параметров продуктов сгорания, поступающих в турбину;

во-вторых, из-за сложного конструктивного оформления ГТУ со сгоранием при  $v = \text{const}$ .





# Тепло

# Техника

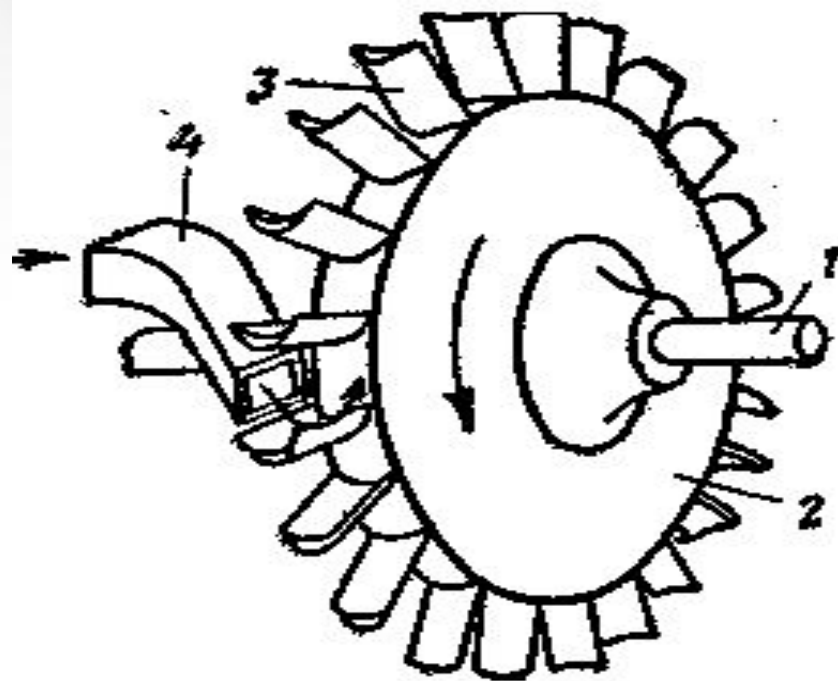
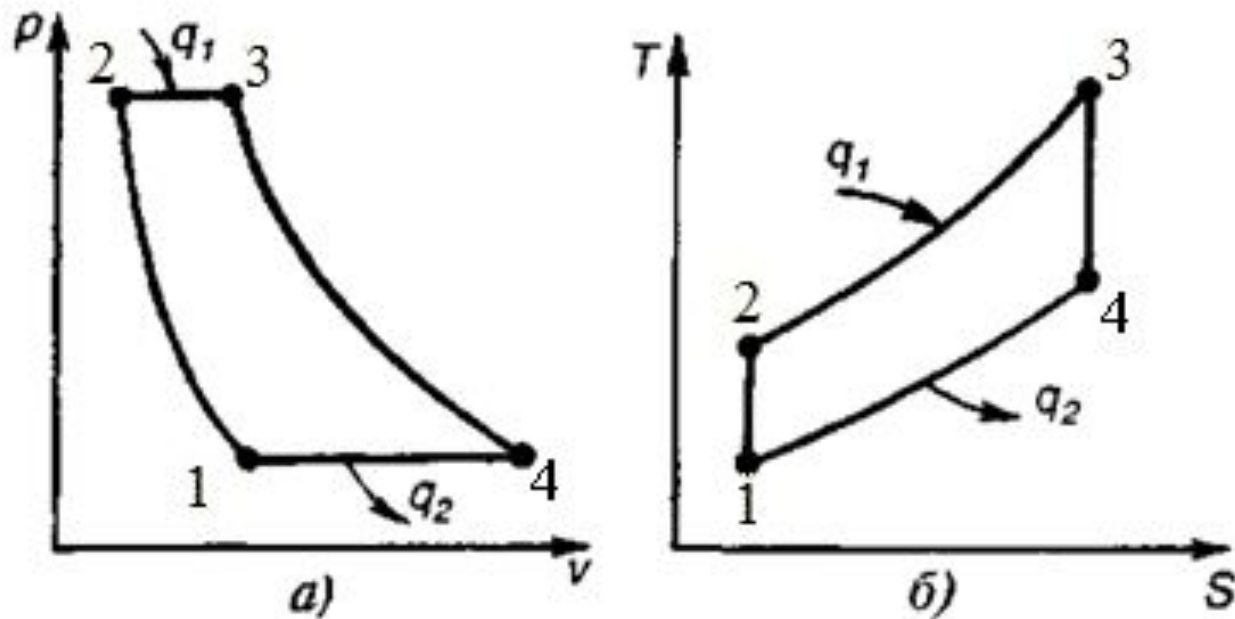


Рис. 9-2. Схематическое изображение турбинного колеса:  
— вал; 2 — диск; 3—лопатки; 4—сопло



Цикл ГТУ со сгоранием при  $p = const$

1-2 Адиабатное сжатие компрессором атмосферного воздуха от давления  $p_1$  до давления  $p_2$  .

2-3 Изобарный подвод теплоты (заменяет процесс сгорания топлива).

3-4 Адиабатное расширение газа на лопатках турбины.

4-1 Изобарный отвод теплоты (заменяет изобарное охлаждение выброшенных в атмосферу продуктов сгорания).

Идеализированный цикл ГТУ состоит из двух адиабат (1-2 и 3-4) и двух изобар (2-3, 4-1).

Параметрами такого цикла являются степень повышения давления в компрессоре  $\beta$  и степень изобарного расширения  $\rho$ .

$$\beta = p_1/p_2, \quad \rho = v_3/v_2.$$



Термический КПД ГТУ со сгоранием при  $p = \text{const}$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

С уменьшением начальной температуры  $T_1$  и с ростом степени повышения давления КПД цикла увеличивается.

# Тепло

# Техника

Мощность, КПД  
и тепловой баланс ДВС

Различают :

- 1) индикаторную (внутреннюю)  $N_i$  мощность, развиваемую рабочим телом в цилиндре ДВС,
- 2) эффективную  $N_e$ , получаемую на валу двигателя,
- 3) литровую (удельную)  $N_l$ , отнесенную к 1 л рабочего объема цилиндра.

1. Индикаторная мощность:

$$N_i = p_i V_h n z /$$

$p_i$  – среднее индикаторное давление, Па;

$V_h$  – рабочий объем цилиндра, м<sup>3</sup>;

$n$  – частота вращения вала двигателя в 1 с;

$z$  – число цилиндров двигателя;  $\tau=4$  для четырехтактных и  $\tau=2$  для двухтактных двигателей.

Среднее индикаторное давление  $p_i = A_i / V_h$ , где  $A_i$  индикаторная работа двигателя.

## 2. Эффективная мощность:

$N_e < N_i$  на величину механических потерь, потерь на привод вспомогательных механизмов (топливного и водяного насосов, вентилятора и т.п.) и потерь, связанных с затратой энергии на всасывание и выхлоп. Они оцениваются мех. КПД:

$$\eta_{me} = \frac{N_e}{N_i}, \quad M \quad i$$

## 3. Литровая мощность

характеризует степень использования рабочего объема цилиндров:

$$N_{л} = N_e / (zV_h).$$



Полнота использования теплоты топлива определяется величиной индикаторного КПД:

$$\eta_i = N_i / (BQ_i^r),$$

где  $B$  – расход топлива, кг/с;

$Q_i^r$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$$\eta_i = \eta_t \eta_{0i}; \quad \eta_t \text{ - термический КПД;}$$

$\eta_{0i}$  - внутренний относительный КПД, учитывающий необратимые потери.

Экономичность ДВС оценивается эффективным КПД:

$$\eta_e = N_e / (BQ_i),$$

Если ДВС используется для привода электрогенератора, то эффективность оценивается электрическим КПД:

$$\eta_{эл} = \eta_{Г} \eta_{Мер} \eta \quad ,$$

$\eta_{Г} \eta_{пер}$  -КПД электрогенератора и трансмиссии.

Баланс мощности для ГТУ:

$$N_{\text{Г.Т.У.}} = N_{\text{К.}} + N_{\text{Э.Г.}} + N_{\text{Н.}}$$

где  $N_{\text{Г.Т.У.}}$  - мощность ГТУ;  $N_{\text{К}}$  - мощность компрессора;  
 $N_{\text{Э.Г.}}$  - мощность электрогенератора;  $N_{\text{Н.}}$  - мощность насоса.

Тепло

Техника

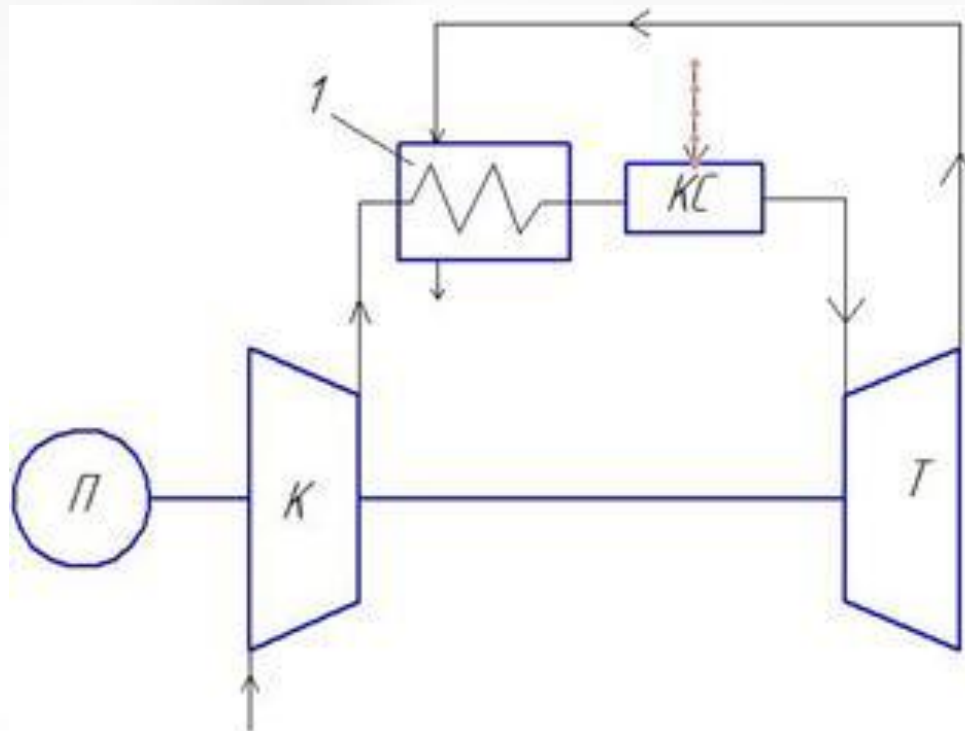
Методы повышения  
термического КПД ГТУ

Для повышения КПД ГТУ применяют следующие методы:

- 1.Регенерация теплоты.
- 2.Многоступенчатое сжатие воздуха с промежуточным охлаждением.
- 3.Многоступенчатое сгорание топлива.



Принципиальная схема ГТУ с подводом теплоты при  
постоянном давлении



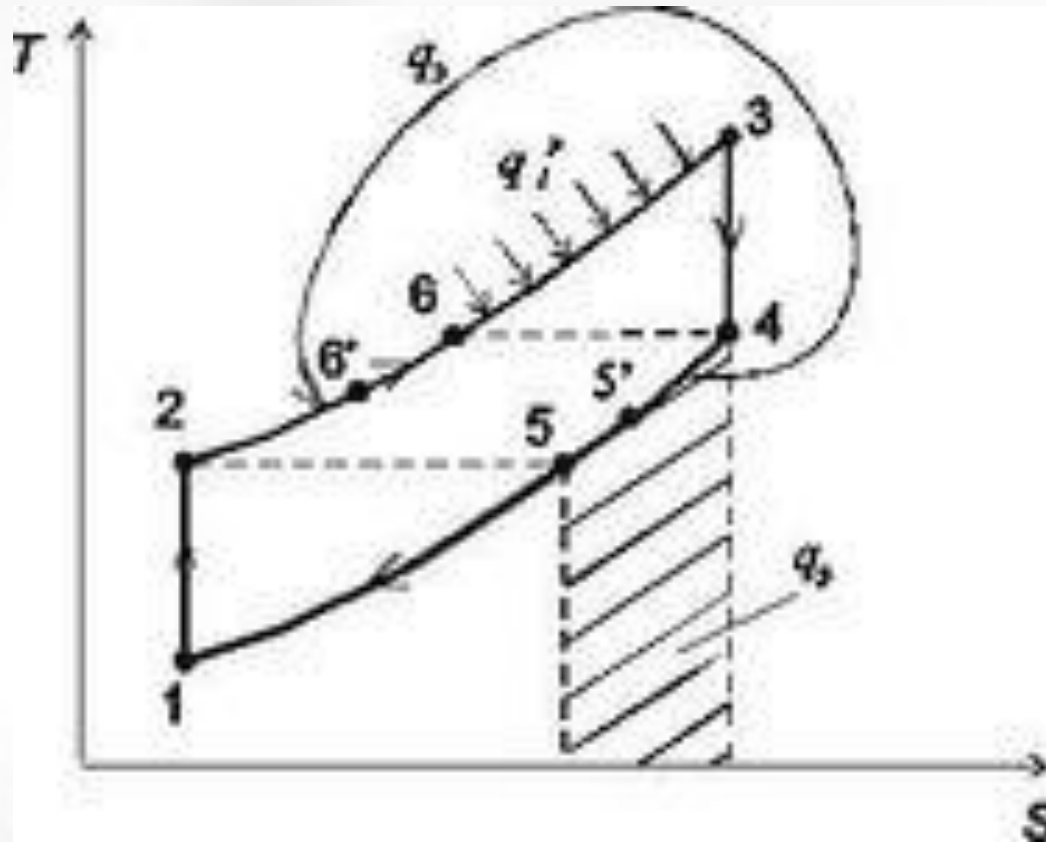
• 1 – регенератор, в котором нагревается воздух за счет теплоты отходящих газов перед поступлением в камеру сгорания

# Тепло

# Техника

Методы повышения  
термического КПД ГТУ

$T_s$  – диаграмма ГТУ с регенерацией теплоты



- 1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре,
- 2-6 изобарный подогрев воздуха в регенераторе,
- 6-3 изобарный подвод теплоты в камере сгорания,
- 3-4 адиабатное расширение в сопловых аппаратах и на лопатках газовой турбины,
- 4-5 изобарный отвод теплоты от газов к воздуху в регенераторе Р,
- 5-1 изобарное охлаждение газов в атмосфере.

Степень регенерации теплоты  $\sigma$  – есть отношение фактически регенерированной теплоты к предельно возможной (полной), изменяется в пределах от 0 до 1:

$$\sigma = \frac{q_{\text{рег.}}(T_p)_{6'-2}}{q'_{\text{рег.}}(T_p)_{6-(T_2-T)_{4-5}}} = \frac{(T_{5'} - T_5)}{(T_2 - T)_{4-5}}.$$

Если  $T_6 = T_{6'}$  ( $T_{5'} = T_4$ ), то регенерация полная  $\sigma=1$ . Это означает, что поступающий в камеру сгорания сжатый воздух нагревается до температуры уходящих газов, т.е.  $T_3 = T_4$ . Степень регенерации увеличивается с увеличением поверхности нагрева регенератора.

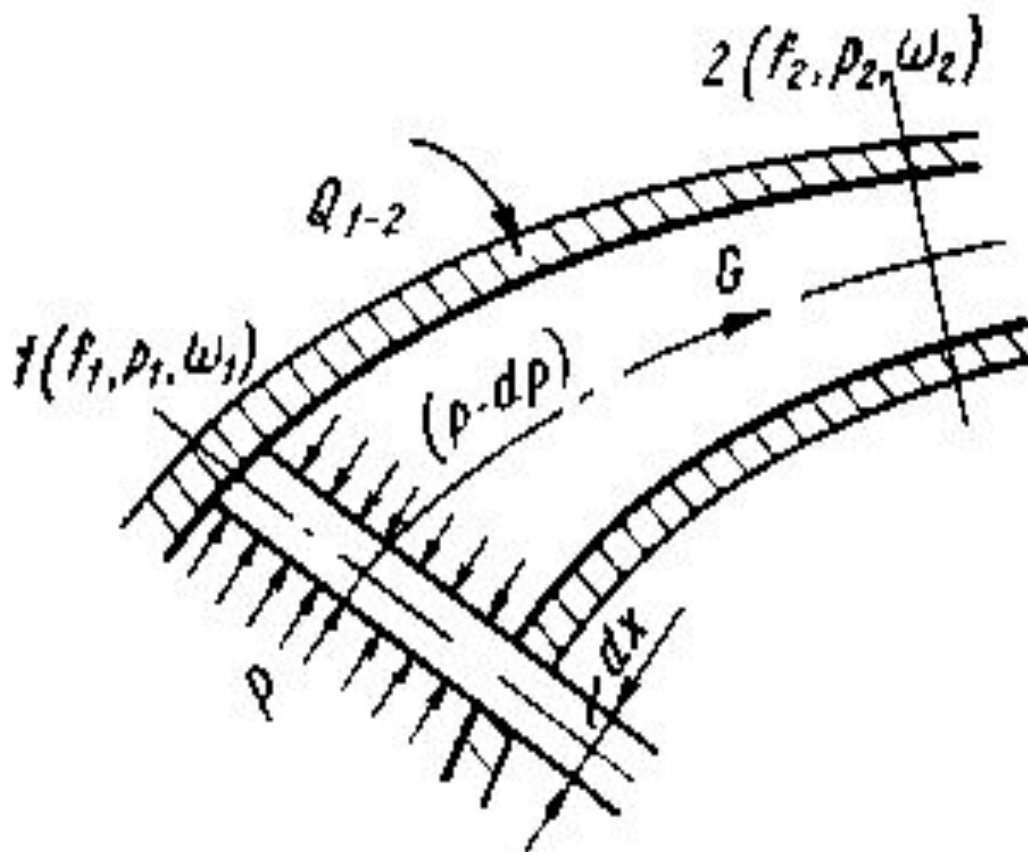


КПД ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении

$$\eta_t^\sigma = 1 - \frac{\rho - 1 - \sigma(\rho - \beta^{\frac{k-1}{k}})}{(\rho - 1)\beta^{\frac{k-1}{k}} - \sigma(\rho - \beta^{\frac{k-1}{k}})}.$$

$$\sigma = 0, \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}},$$

$$\sigma = 1, \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\rho}.$$



Все подводимое к т/д системе тепло расходуется на изменение ее внутренней энергии и на работу изменения объема системы.

$$Q = U_2 - U_1 + \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV, \quad (a)$$

$$q = u_2 - u_1 + \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dv, \quad (б)$$

$$dq = du + \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dv, \quad (B)$$

Если поток рабочего тела проходит через теплотехническое устройство, в котором протекает обратимый процесс, то тепло  $Q$ , подводимое к потоку, расходуется на:

- а) изменение внутренней энергии  $U_1 - U_2$ ;
- б) работу проталкивания  $p_2 V_2 - p_1 V_1$ ;
- в) изменение внешней кинетической энергии

$$G \cdot \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2}$$



г) изменение потенциальной энергии  $Gg(H_2 - H_1)$  ;

д) на полезную работу потока, совершаемую им при помощи подвижных элементов устройства над внешним объектом, ее называют технической работой ( $L_{\text{тех}}$ ).

Для  $G$  кг рабочего тела при разности отметок потока  $H_2 - H_1$

$$Q = U_2 - U_1 + (p_2 V_2 - p_1 V_1) + \quad (д)$$
$$+ G \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2} + Gg(H_2 - H_1) + L_{\text{тех}}$$

Для потока уравнение 1-го закона термодинамики:

$$q_{\text{техн}} = (i_2 - i_1) + \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2g} + (h_2 - h_1) + 1 + 1$$

в диф. форме:

$$dq = di + \frac{wdw}{g} + dh + dl_{\text{тех}} + dl_{\text{тр}}$$

Подводимое к потоку тепло  $q$  состоит из тепла  $q_{\text{внеш}}$ , поступающего извне, и тепла трения  $q_{\text{тр}}$ :

$$q = q_{\text{внеш}} + q_{\text{тр}},$$

Тепло подвод. (отвод.) к потоку  $q_{внеш}$ , расходуется на изменение энтальпии жидкости и на скорость движения жидкости

Для случая адиабатного потока ( $dq_{внеш} = 0$ ):

$$di + \frac{wdw}{g} = 0. \quad (1)$$

Если адиабатный поток ускоряется ( $dw > 0$ ), то его энтальпия уменьшается ( $di < 0$ ), и наоборот. Ускорение адиабатного потока происходит за счет уменьшения его энтальпии.

Для случая адиабатного течения ( $q_{внеш1-2} = 0$ ) и при отсутствии техн. работы ( $l_{техн} = 0$ ):

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{w_1^2}{2g} + h_1 = u_2 + p_2 v_2 + \frac{w_2^2}{2g} + h_2 \quad (2)$$

Для несжимаемой жидкости ( $dv = 0$ )  $du = 0$ , т.е.  $u_1 = u_2$  уравнение (2) примет вид:

$$p_1 v_1 + \frac{w_1^2}{2g} + h_1 = p_2 v_2 + \frac{w_2^2}{2g} + h_2$$



С учетом того, что  $v = l/\gamma$ , где  $\gamma$  - удельный вес, а  $\gamma = g/\rho$ , где  $\rho$  - плотность получаем:

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + \rho g h_2, \quad (3)$$

(3) - называется **уравнением Бернулли**.

Если  $h_1 = h_2$ , то уравнение (3) имеет вид:

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2}. \quad (4)$$

Комплекс  $\rho w^2/2$  – называется динамическим давлением (напором) в отличии от  $p$ , называемым статическим давлением. Сумма статического и динамического давлений называется полным давлением потока.

Из (4) следует, что в обратимом адиабатном потоке для несжимаемой жидкости при  $h=\text{const}$  полное давление постоянно по длине потока.

При торможении потока ( $w=0$ ) статическое давление становится равным полному давлению.

Интегрируя уравнение (1) между двумя точками потока, получаем:

$$i_1 - i_2 = \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2g},$$

откуда

$$w_2 = \sqrt{2g(i_1 - i_2) + w_1^2}$$

При течении без трения при  $l_{\text{техн}} = 0$  и  $dh = 0$

$$\frac{wdw}{g} = -vdp. \quad (5)$$

Если давление по движению потока падает ( $dp < 0$ ), то скорость потока возрастает ( $dw > 0$ ) и наоборот.

Интегрируя (5):

$$\frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp$$

$$w_2 = \sqrt{2g \int_{p_2}^{p_1} v dp + w_1^2} \quad (6)$$





# Тепло

# Техника

Величина работы, расходуемой на увеличение кинетической энергии потока равна работе расширения и работе проталкивания потока.

Уравнение (6) справедливо для любого случая течения без трения. Зависимость  $v(p)$  различна для разных процессов, и различными будут значения интеграла.

Для реальных газов этот интеграл вычисляется по экспериментальным  $p$ ,  $v$ ,  $T$  данным численными методами, а для ид. газов – по уравнению адиабаты.

# Тепло

# Техника

Т.к.  $\int_{p_2}^{p_1} v dp = \int_{v_1}^{v_2} p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$

работа проталкивания является «неизбежной спутницей» всякого течения, то из работы совершаемой системой может быть полезно использована работа за вычетом работы проталкивания, т.е. величина

$$\frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g}$$

Т.е. превратить в другие виды работы можно лишь ту часть работы расширения потока, которая идет на увеличение кинетической энергии.

# Тепло

# Техника

Найдем соотношение связывающее между собой перепад энтальпий и величину располагаемой работы.

Из 1-го закона т/д  $dq = di - vdp$ , при  $q = 0$ , следует  $di = vdp$  и следовательно:

$$i_1 - i_2 = \int_{p_2}^{p_1} vdp.$$

Тепло

Техника

Методы повышения  
термического КПД ГТУ