

# Теория турбомашин

*Курс лекций . 4 лекция*

Доцент, кандидат технических наук

**Юрий Владимирович Кожухов**

[www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

Доц. Ю.В. Кожухов

# Теория турбомашин. Лекция 4.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Термодинамические и газодинамические основы теории турбомашин

- Действительный трехмерный нестационарный характер течения и его схематизация: осредненный по времени стационарный поток, квазитрехмерный поток, двухмерный поток, одномерный поток.
- Статические и полные (заторможенные) параметры газа.
- Уравнения сохранения энергии в «механической» форме (уравнение Бернулли). Удельная механическая работа – напор.
- Основное уравнение турбомашин (уравнение Эйлера).
- Уравнение состояния, учет несовершенства газа.
- Уравнение процесса. Изображение процессов сжатия и расширения в турбомашине в диаграммах  $T-s$  и  $i-s$ . Адиабатная, политропная и изотермная работа сжатия и расширения.

Действительный трехмерный нестационарный характер течения и его схематизация

---

Поток меняет свои параметры в направлении всех трех координатных осей ( $z$ ,  $r$ ,  $u$ ), поток является пространственным, **трехмерным.**

Кроме того, поток является **нестационарным**, то есть его параметры зависят от времени  $t$ .

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 4.

Действительный трехмерный нестационарный характер течения и его схематизация

В общем случае:

$$\vec{c}, (\vec{w}), p, T = f(z, r, u, t)$$

## Действительный трехмерный нестационарный характер течения и его схематизация

При решении инженерных задач и общем анализе рабочего процесса применяется ряд упрощающих приемов, а именно:

1. Рассматриваются установившиеся режимы, а **периодическая нестационарность** не принимается во внимание. Т.е. рассматривается **стационарный поток**. В расчете участвуют параметры потока, осредненные по времени:

$$\vec{c}, (\vec{w}), p, T = f(z, r, u)$$

## Действительный трехмерный нестационарный характер течения и его схематизация

2. На первой стадии анализа, расчета и проектирования течение рассматривается **одномерным**. То есть, параметры потока считаются постоянными по поверхности контрольных сечений и меняются только от одного сечения к другому:

$$\vec{c}, (\vec{w}), p, T = f(l)$$

Действительный трехмерный нестационарный характер течения и его схематизация

**3. Двухмерный поток** – рассматривается течение на некоторой средней по высоте лопатки осесимметричной поверхности тока. Координаты двухмерного потока:

ОК –  $z, u$  ( $r = \text{const}$ );

ЦК –  $u, r$  ( $z = \text{const}$ ).

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

**4. Квазитрехмерное течение (поток)** – совокупность двухмерных течений на ряде ОПТ.

## Статические и полные (заторможенные) параметры газа

Термины «параметры торможения» или «заторможенные параметры», или «полные параметры» связаны с тем, что значение  $p^*$  газа, движущегося со скоростью « $c$ » имело бы место при его торможении до нулевой скорости при отсутствии внешнего теплообмена и подвода (отвода) механической работы.

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

Статические и полные (заторможенные) параметры газа

$$p^* = p + \frac{\rho c^2}{2} - \text{давление торможения.}$$

$$T^* = T + \frac{c^2}{2c_p} - \text{температура торможения.}$$

$p$  и  $T$  – статические давление и температура.

Больше информации о компрессорной  
технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Основные уравнения, описывающие рабочий процесс в турбокомпрессоре. Напор. Уравнение Бернулли

Понятие напора:

$$H = N / \dot{m} \text{ [Дж/кг]}$$

- напор – удельная работа, т.е. отнесенная к единице массы газа

$H$  – напор для всего компрессора

$h$  – напор для одной ступени

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Напор

---

Словесная формулировка уравнения Бернулли:

**Механическая работа, сообщаемая газу рабочим колесом турбокомпрессора, расходуется на сжатие и перемещение газа, увеличение его кинетической энергии и преодоление сопротивления движению.**

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Уравнение Бернулли

### Уравнение Бернулли:

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$$h_i = h_{\Pi} + h_{\text{д}} + h_{\text{т}} \quad [\text{Дж/кг}]$$

$h_i$  – **внутренний напор** – механическая работа, передаваемая единице массы газа при его прохождении через рабочее колесо;

## Уравнение Бернулли

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$$h_{\Pi} = \int_1^2 v dp = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \text{ — политропный напор —}$$

— работа, необходимая для повышения давления (сжатия)

и перемещения единицы массы газа из области с давлением  $p_1$

в область с давлением  $p_2$

## Уравнение Бернулли

$h_d = 0,5(c_2^2 - c_1^2)$  – **динамический напор** –  
изменение кинетической энергии единицы  
массы газа при прохождении между контрольными  
сечениями «1» и «2»;

Больше информации о компрессорной  
технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$h_r$  – механическая работа, необходимая для  
преодоления сопротивления движению единицы  
массы газа в ПЧ (проточная часть) между  
сечениями «1» и «2».

## Уравнение Бернулли

Если уравнение Бернулли используется применительно к неподвижным каналам (диффузоры и направляющие аппараты, входные и выходные элементы ТК), то

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$$h_{\Pi} + h_{\text{д}} + h_r = 0,$$

или  $\Delta p^*/\rho = -h_r$ , т.е. в таких каналах давление может возрастать за счет снижения скорости, а сопротивление преодолевается за счет снижения полного давления.

## Уравнение Бернулли

Напоры  $H$  есть сумма напоров ступеней  $h$  многоступенчатого компрессора, в которых осуществляется последовательное сжатие:

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$$H = \sum_1^z h$$

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 4.

Уравнение Эйлера («основное уравнение турбомашин»)

Словесная формулировка уравнения Эйлера:

**Механическая работа, передаваемая единице массы газа рабочим колесом турбокомпрессора, равна произведению окружной составляющей абсолютной скорости газа на окружную скорость на выходе из лопаток колеса за вычетом такого же произведения перед входом на лопатки колеса.**

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Уравнение Эйлера («основное уравнение турбомашин»)

Уравнение Эйлера:

$$h_T = c_{u2}u_2 - c_{u1}u_1$$

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$h_T$  – теоретический напор

При отсутствии закрутки  $c_{u1}$  на входе в РК:

$$h_T = c_{u2}u_2$$

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 4.

Основные уравнения, описывающие рабочий процесс в турбокомпрессоре

$$h_i > h_T > h_{II}$$

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 4.

Уравнение состояния газа. Учёт сжимаемости газа.

Уравнение состояния связывает давление, температуру и удельный объем (или плотность) газа:

$$pv = p/\rho = zRT,$$

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

где  $z$  – безразмерный **коэффициент сжимаемости**  $z \geq 1$   
– учитывает реальность газов. Для совершенного газа  $z = 1$

## Уравнение процесса

Затрата механической работы на преодоление сопротивления движению единицы массы газа – потерянный напор  $h_r$  – преобразуется в тепло  $q_r$ , рассеивающееся в этой же массе газа:

$$h_r = q_r \text{ (} h \text{ и } q \text{ – удельные величины, отнесенные к единице массы газа).}$$

Процесс изменения параметров невязкого газа при отсутствии внешнего теплообмена ( $q_{\text{вн}} = 0$ ,  $q_r = 0$ ) является **изоэнтропным (адиабатным)**: энтропия газа постоянна  $s = \text{const}$ .

Больше информации о компрессорной  
технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Уравнение процесса

Энтропия есть характеристика термодинамического процесса, определяемая уравнением:

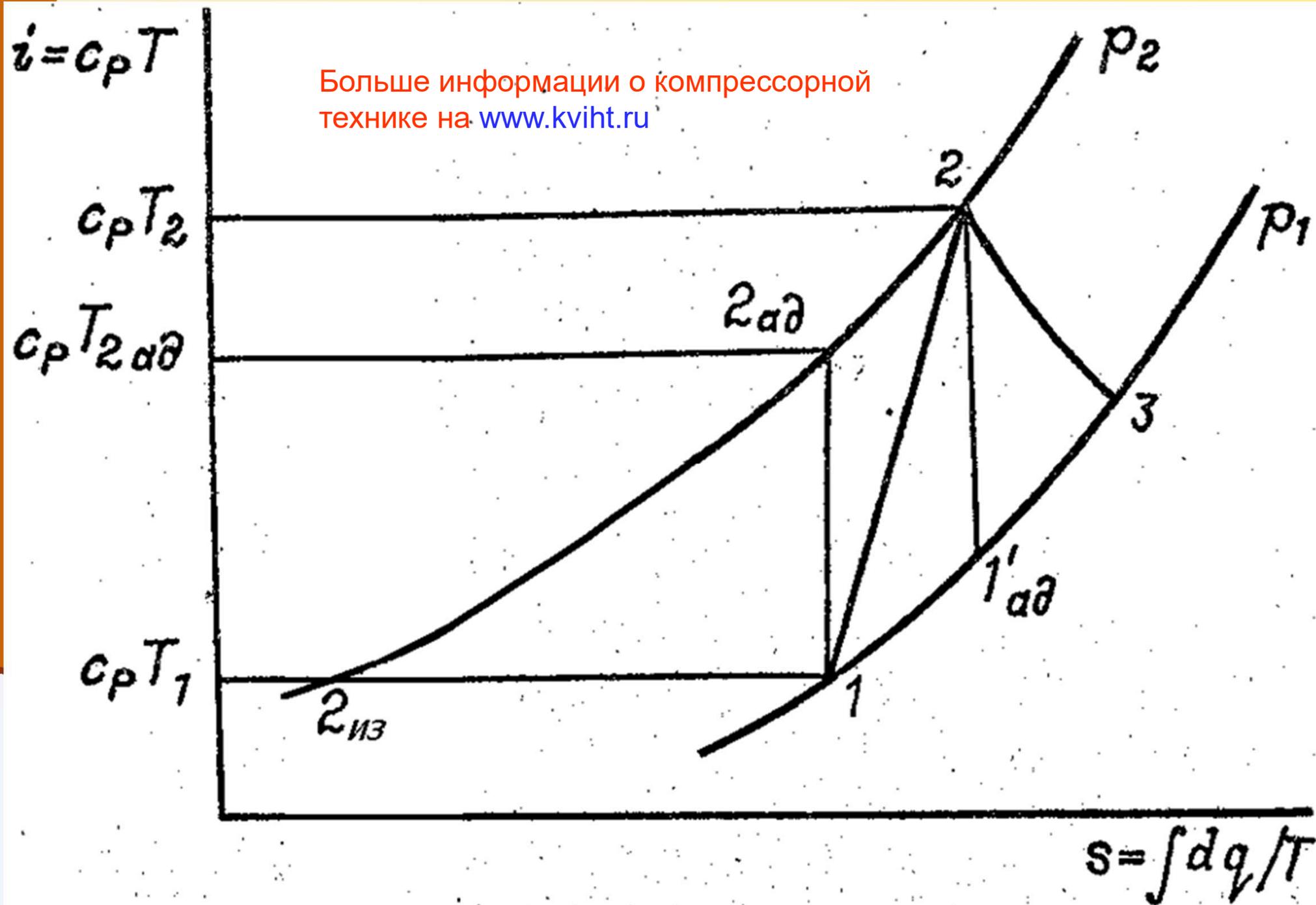
Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$$ds = \frac{dq}{T}, \quad dq = dq_{\text{вн}} + dq_r.$$

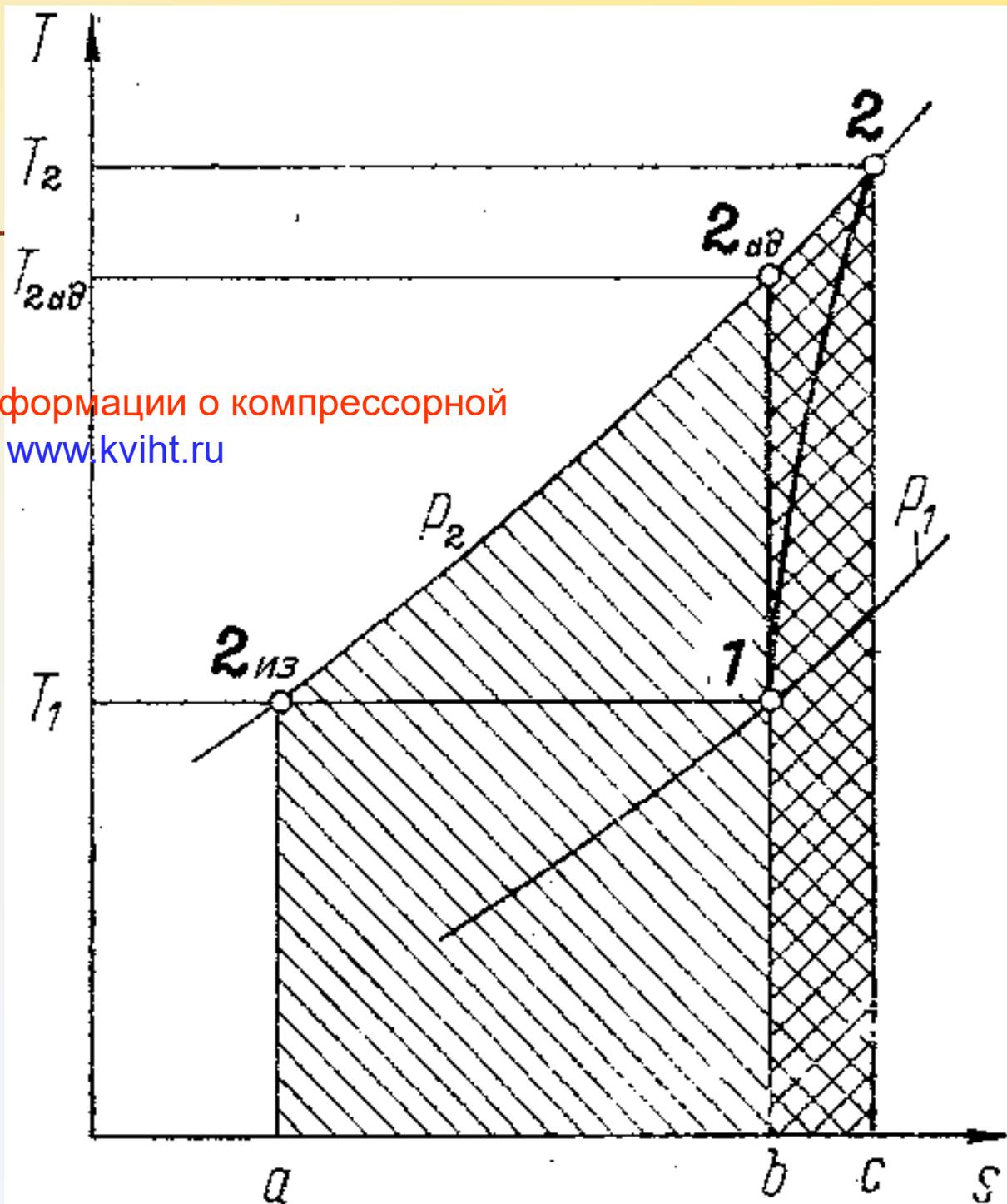
При изоэнтропном процессе (в технической литературе такой процесс обычно именуется **адиабатным**, что неточно, но общепринято):

$$dq_{\text{вн}} = 0, \quad dq_r = 0.$$

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)



Больше информации о компрессорной  
технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 4.

## Уравнение процесса

Изменение параметров газа при изоэнтальпном (адиабатном) процессе подчиняется зависимости

– **уравнению изоэнтальпного процесса:**

$$pv^k = p/\rho^k = const,$$

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

где  $k = c_p/c_v$  – показатель изоэнтальпии (адиабаты).

Адиабатный процесс является **обратимым**.

## Уравнение процесса

Работа изоэнтропного сжатия при повышении давления от значения  $p_1$  до значения  $p_2$  эквивалентна площади  $a-2_{из}-2_{ад}-b$  и может быть рассчитана по формуле:

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

$$h_{ад} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left( \pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right),$$

где  $\pi = p_2/p_1$  – отношение давлений.

## Уравнение процесса

**Уравнение политропного процесса:**

$$p v^n = p / \rho^n = \text{const},$$

Показатель процесса при ( $h_r = q_r > 0$ ) больше показателя адиабаты:  $n > k$ .  
Это различие тем сильнее, чем большими потерями механической работы на преодоление сопротивления сопровождается рабочий процесс.

Больше информации о компрессорной  
технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Уравнение процесса

На  $T-s$  диаграмме процесс политропного сжатия изображается линией 1-2, при этом работа политропного сжатия эквивалентна площади  $a-2_{из}-2-1-b$  и может быть рассчитана по формуле:

$$h_{\pi} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right).$$

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

## Уравнение процесса

В **изотермном** процессе от газа отводится тепло, равное по величине подведённой к газу работе. Таким образом, газ в изотермном процессе рассматривается как совершенный, т.е. без увеличивающего температуру взаимодействия молекул. Показатель политропы для совершенного газа  $n = 1$ :

$$pv = p/\rho = \text{const}$$

## Уравнение процесса

На  $T-s$  диаграмме процесс изотермного сжатия изображается линией  $1-2_{\text{из}}$ , при этом работа политропного сжатия эквивалентна площади  $a-2_{\text{из}}-1-b$  и может быть рассчитана по формуле:

$$h_{\text{из}} = RT_1 \ln \pi$$

Уравнение процесса

$$h_{\text{п}} > h_{\text{ад}} > h_{\text{из}}$$

Больше информации о компрессорной  
технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 4.

---

***БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ***

Больше информации о компрессорной технике на [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)  
Телефон +7 (812) 715-41-64