

Дисциплина **TU 3218** «Турбинные установки»

Модуль **ESTA 08** «Электрические станции и теплообменные аппараты»

Специальность **6B07108** - «Теплоэнергетика»

Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникации

Кафедра «Энергетические системы»

Калытка Валерий Александрович

Доктор PhD; ассоциированный профессор (доцент); доцент
кафедры «Энергетические системы»

II. Аналитические методы исследования процессов рабочего вещества в проточной части паровой турбины

В данном блоке лекций рассматривается теоретический аппарат, позволяющий, методами гидродинамики, термодинамик и теории теплообмена, сформулировать основные уравнения процессов рабочего вещества в проточной части осевой ступени паровой турбины, исследовать схемы решений (аналитических, численных) этих уравнений и, на этой основе, перейти к качественному анализу процессов преобразования различных видов энергии на элементах турбины.

Данный блок лекций формально разделен на 4 основные части:

1. Преобразование энергии в турбинной ступени (лекции № 6,7,8).
2. Геометрические характеристики осевой ступени турбины (лекции № 9,10).
3. Усилия на рабочих лопатках осевой ступени турбины (лекция № 11).
4. Основные потери в лопаточных решётках, относительный лопаточный КПД (лекция 12).

1. Преобразование энергии в турбинной ступени



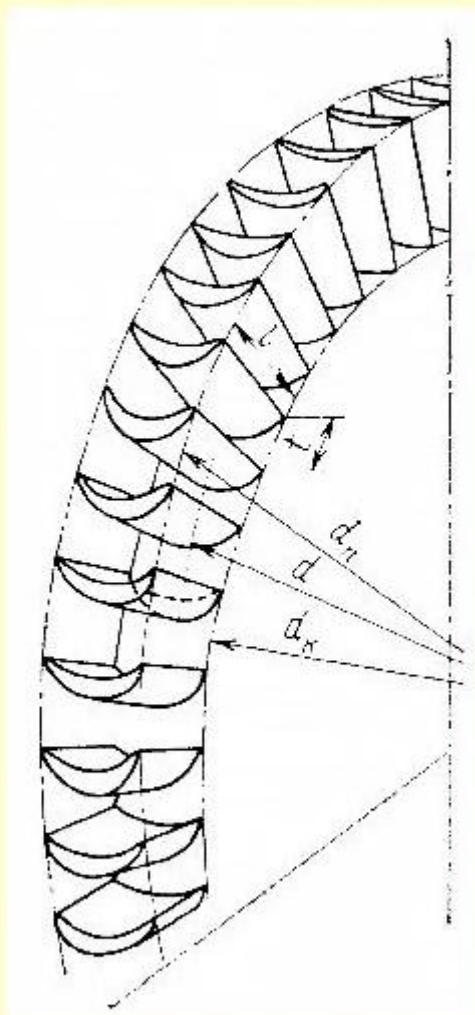
Лекция №6. Преобразование энергии в турбинной ступени. Уравнение состояния и изоэнтропы

Цель лекции состоит в ознакомлении с физическими принципами преобразования различных видов энергии на элементах турбиной ступени.

План лекции

1. Принцип работы турбины
2. Физические свойства рабочего тела в турбомашинах
3. Уравнение состояния газа
4. Уравнение состояния и изоэнтропы
5. К выводу уравнения неразрывности
6. Уравнение изменения количества движения (уравнение импульса)
7. Видеоролик:
 - 6.1. «Газотурбинные установки. Принцип работы. Рабочие циклы» (11 мин 40 сек)
<https://www.youtube.com/watch?v=mbAGu7tK5Js&t=564s>
 - 6.2. ГТУ. Турбина в работе (4 мин)
<https://www.youtube.com/watch?v=QcYMFma2Gc8&t=11s>
 - 6.3. 3D animation of industrial gas turbine working principle
<https://www.youtube.com/watch?v=GF-70yncAVY>
 - 6.4. How a Gas Turbine Works. Gas Power Generation. GE Power
<https://www.youtube.com/watch?v=zcWkEKNvqCA>

Принцип работы турбины



Работа турбины основана на возникновении *подъёмной силы* при обтекании потоком крыловидного профиля.

Для получения подъёмной силы необходимо иметь высокоскоростной поток рабочего тела (пара или газа) и крыловидные профили, при обтекании которых и будет возникать подъёмная сила. Если эти профили, называемые рабочими лопатками, закрепить на валу турбины на определённом расстоянии друг от друга, образуя тем самым рабочую решётку, то подъёмная сила, прикладываемая у центру масс каждой рабочей лопатки, будет передаваться на вал и вызывать его вращение.

Рис. 1. Фрагмент кольцевой лопаточной решётки



Физические свойства рабочего тела в турбомашинах

Рабочим телом в турбомашинах является пар или газ. Однако, с точки зрения гидрогазодинамики, их можно рассматривать как частные случаи *жидкости*.

В отличие от твёрдых тел, в которых молекулярные силы сцепления весьма велики, жидкости, и в особенности газы, обладают относительно слабыми межмолекулярными связями. Эта особенность их физической природы проявляется в лёгкой подвижности, т.е. *текучести* или деформируемости: движение жидкостей и газов под действием внешних и внутренних сил сопровождается изменением формы, а в общем случае — и объёма выделенной её части.

В гидрогазодинамике обычно абстрагируются от молекулярной структуры исследуемых потоков и рассматривают условную модель среды, обладающей непрерывным распределением всех характеристик (параметров). Гипотеза непрерывности (сплошности) объединяет жидкости и газы в единую категорию текучих, легко деформируемых сред.



Физические свойства рабочего тела в турбомашинах

Вместе с тем между жидкостями и газами существует принципиальное различие. В жидкостях силы межмолекулярного сцепления более значительны по сравнению с газами, так как расстояния между молекулами малы. По этой причине жидкости можно считать слабосжимаемыми средами или, упрощенно, *несжимаемыми*.

В газах расстояния между молекулами значительно больше, чем в жидкостях, и силы молекулярного взаимодействия поэтому относительно малы. Этой особенностью молекулярной структуры газов объясняется их существенно *большая* по сравнению с жидкостью *сжимаемость*. При этом жидкость *принимает форму сосуда*, в который она заключена, но *образует поверхность свободного уровня*. На такой поверхности особенно интенсивно сказывается воздействие молекулярных сил сцепления, что приводит к появлению свойств капиллярности, смачиваемости твёрдых поверхностей и к возникновению капель и менисков. Хорошо известно, что газы *целиком заполняют сосуд*, в который они помещены, и *не образуют поверхности свободного уровня*.



Физические свойства рабочего тела в турбомашинах

Эффекты *сжимаемости* интенсивно проявляются при движении газов в каналах с большими скоростями и при обтекании тел различной формы потоком с большой скоростью. При небольших скоростях и в отсутствие теплообмена сжимаемость газов сказывается слабо. Вместе с тем сжимаемость капельных жидкостей также обнаруживается при больших давлениях. Отсюда следует, что сжимаемость свойственна всем жидкостям и газам, однако её количественное проявление будет различным в зависимости от физических свойств среды. Это послужило основанием объединить сплошные среды, обладающие общим свойством сплошности и лёгкой подвижности, под общим названием *жидкости*, выделяя по мере необходимости практически несжимаемые (*капельные*) и сжимаемые (*газообразные*) жидкости.



Физические основы одномерной теории турбомашин

Реальные процессы протекания рабочего тела (пара, газа) в турбомашинах трёхмерны (по осям x , y , z), однако трёхмерный расчёт сопряжён со значительными трудностями. В большинстве случаев оказывается оправданным считать движение рабочего тела одномерным, т.е. предполагать, что изменение параметров рабочего тела происходит *в одном направлении* (условно, по оси x).

При расчёте турбомашин непрерывное течение рабочего тела можно рассматривать как равновесный процесс. Это означает, что движущееся рабочее тело находится *в термодинамическом равновесии* и имеет вполне определённые значения параметров (температуры T или t , давления p , энтальпии h , энтропии s и т.д.), непрерывно изменяющиеся с течением времени (в конкретной точке) и при переходе от одной точки к другой.

Кроме того, движение рабочего тела считают установившимся или стационарным. Это означает, что в каждой точке потока рабочего тела все параметры имеют определённые, *не изменяющиеся во времени значения*.

Таким образом, мы будем рассматривать одномерное установившееся течение рабочего тела.



Физические основы одномерной теории турбомашин

Для расчёта течения жидкости используют 4 закона, выражающихся следующими уравнениями:

- уравнение состояния;
- уравнение неразрывности (сохранения массы);
- уравнение сохранения количества движения (уравнение импульса);
- уравнение сохранения энергии (1-й закон термодинамики).



Уравнение состояния

Для идеального газа уравнение состояния имеет вид:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \text{или} \quad \frac{p}{\rho} = R \cdot T$$

и связывает основные параметры газа: давление [Па], температуру [К] и удельный объём [м³/кг] или плотность [кг/м³].

Здесь R [Дж/кг·К] – газовая постоянная, представляющая собой работу 1 кг газа при его нагреве на 1 К.

Принимается $R = 287$ [Дж/кг·К] (*воздух*); $R = 461$ [Дж/кг·К] (*пар*)

Для перегретого пара уравнение состояния в указанном виде неточно, т.к. R зависит от давления и температуры. Значительно точнее соблюдается зависимость:

$$h = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p \cdot v + const$$

Иногда пар, свойства которого удовлетворяют этому уравнению, называют «идеальным».



Уравнение состояния и изоэнтропы

Здесь κ – показатель изоэнтропы, который зависит от температуры и выражается как

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Принимается в среднем $\kappa = 1,4$ для воздуха и $\kappa = 1,3$ для перегретого пара (точнее, от 1,26 до 1,33), а для сухого насыщенного пара $\kappa = 1,26 \div 1,33$.

Если предположить, что расширение газа происходит без потерь и без теплообмена с внешней средой, то этот процесс называется *изоэнтропийным* и газ подчиняется уравнению изоэнтропы:

$$p \cdot v_t^\kappa = const$$

где индекс t означает, что процесс идет по изоэнтропе.



Уравнение неразрывности

Массовым расходом газа G [кг/с] называют массу газа m [кг], которая проходит через поперечное сечение канала в единицу времени τ [с], т.е.:

$$G = \frac{m}{\tau}$$

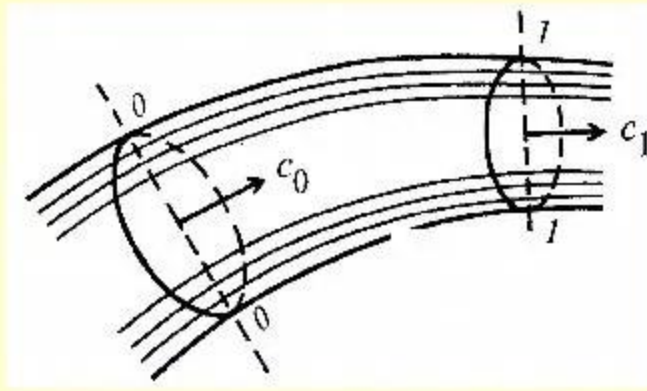


Рис. 2. К выводу уравнения неразрывности

Массовый расход газа G через любое поперечное сечение канала сохраняется постоянным, т.е.:

$$G = \frac{F \cdot c}{\nu} = const \quad \text{или} \quad G = \rho \cdot c \cdot F = const$$

Здесь ν – удельный объем [м³/кг], а ρ – плотность [кг/м³].



Уравнение сохранения количества движения (импульса)

Уравнение изменения количества движения (уравнение импульса) в одномерном потоке (для установившегося течения) имеет вид:

$$-\nu \cdot dp - R \cdot dx = c \cdot dc$$

(вывод данного уравнения см. на стр. 42 «Красной книжки»-2008)

где ν – удельный объём, dp – приращение давления, R – сила сопротивления внешней среды, отнесённая к 1 кг массы протекающего газа, dx – длина трубки тока, c – скорость потока газа, dc – приращение скорости.

Интегрируя это выражение на участке конечного пути перемещения газа, перейдем от уравнения количества движения к частному случаю уравнения сохранения энергии:

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} \nu dp - \int_{x_0}^{x_1} R dx$$



Уравнение сохранения количества движения (импульса)

Найдя из уравнения изоэнтропы:

$$v_t = v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

и подставляя под интеграл, получаем:

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\kappa}} dp$$

Решая этот интеграл, получаем окончательно:



Уравнение сохранения количества движения (импульса)

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot (p_0 \cdot v_0 - p_1 \cdot v_{1t})$$

Данное выражение было получено для трубки тока, имеющей в основаниях элементарные площади f_0 и f_1 . Однако этот вывод можно распространить и на весь канал, только в этом случае под скоростями, давлениями и удельными объёмами следует подразумевать их осреднённые по сечению значения.

