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»

Лекция №7. Уравнение сохранения энергии в турбинной ступени

Цель лекции состоит в ознакомлении с физическими интерпретациями закона сохранения энергии для термодинамических систем (первый закон термодинамики) для потока рабочего вещества (в механической форме), двигающегося в направлении оси проточной части турбиной ступени.

План лекции

1. Основные законы термодинамики
2. Уравнение сохранения энергии
3. Видеоролик: «Основные законы термодинамики» (18 мин 39 сек)
https://www.youtube.com/watch?v=GbvnLmY7COY

Уравнение сохранения энергии

Преобразование внутренней энергии газа в работу в турбине происходит в соответствии с первым законом термодинамики, конкретная запись которого для быстро движущегося газа имеет специфическую форму.

Рассмотрим протекание газа по каналу переменного сечения. Осреднённые параметры газа на входе:

$$p_0, \upsilon_0, T_0, c_0$$

На выходе:

$$p_1, \upsilon_1, T_1, c_1$$

Допустим, что на участке канала *0-0 – 1-1* подводится теплота q и отводится работа l (см. рис. 3).

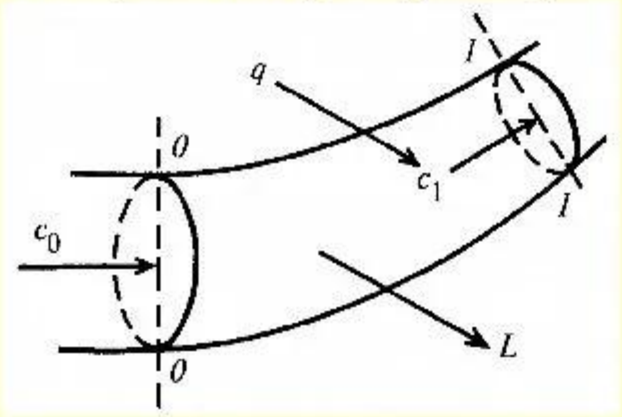

Рис. 3. К выводу уравнения энергии

Уравнение сохранения энергии

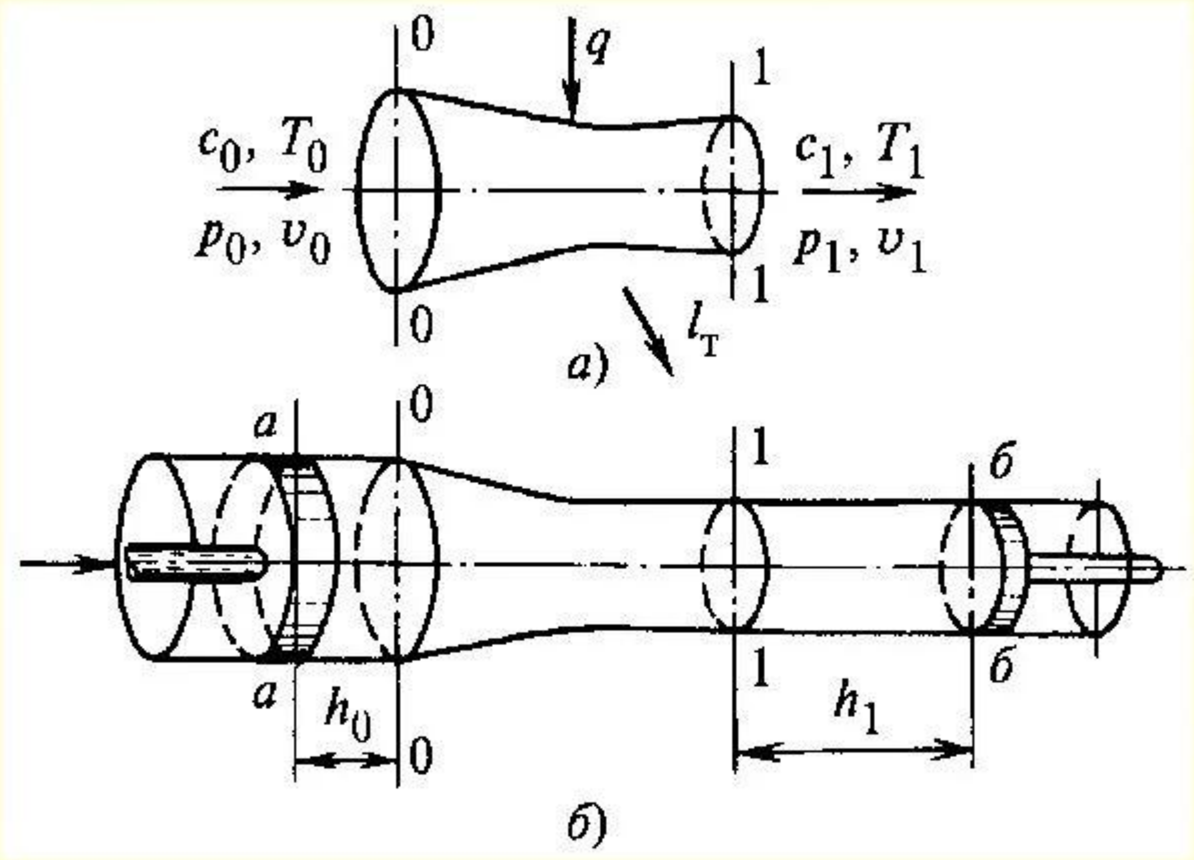

Рис. 4. К выводу уравнения первого закона термодинамики для потока газа

Уравнение сохранения энергии

В соответствии с первым законом термодинамики подводимая к системе теплота расходуется на повышение внутренней энергии и совершение работы, т.е.:

$$q = \Delta u + l$$

где первый член в правой части – изменение внутренней энергии – выражается как:

$$\Delta u = u_1 - u_0$$

а второй член, l – работа, имеет несколько составляющих.

Если канал движется, то совершается техническая работа l_T. В частности, это относится к каналам, расположенным на роторе турбины, т.е. каналам между рабочими лопатками.

Далее, поскольку скорости газа в сечениях *0-0* и *1-1* разные, произойдет изменение кинетической энергии на величину:

$$l_к = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2}$$

Уравнение сохранения энергии

Третья составляющая – работа проталкивания, т.е.:

$$l_п = p_1 \cdot \upsilon_1 - p_0 \cdot \upsilon_0$$

Тогда суммарная работа записывается как:

$$l = l_т + l_к + l_п$$

Вернёмся теперь к записи первого закона термодинамики и подставим в него все найденные члены:

$$q = \Delta u + l = u_1 - u_0 + l_т + l_к + l_п = u_1 - u_0 + l_т + \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} + p_1 \cdot \upsilon_1 - p_0 \cdot \upsilon_0$$

Учтём теперь, что, согласно уравнению Клапейрона-Менделеева, энтальпия h является суммой внутренней энергии u и энергии проталкивания $p \cdot \upsilon$, т.е.:

$$h = u + p \cdot \upsilon$$

Уравнение сохранения энергии

Тогда:

$$q = u_1 + p_1 \cdot \upsilon_1 - \left(u_0 + p_0 \cdot \upsilon_0\right) + \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} + l_{\text{т}}$$

Или:

$$q = h_1 - h_0 + \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} + l_{\text{т}}$$

Таким образом, теплота, подводимая к потоку газа, расходуется на изменение его энтальпии, изменение кинетической энергии и совершение технической работы.

Это выражение называется уравнением сохранения энергии для установившегося потока. Оно справедливо независимо от того, сопровождается ли течение газа потерями или нет.

Уравнение сохранения энергии

Полученные уравнения позволяют решать ряд практических задач для расчёта течения в каналах. Например, предположим, что газ движется в неподвижном канале без теплообмена с окружающей средой. Тогда:

$$l_{\text{т}} = 0 \quad \text{и} \quad q = 0$$

Такое течение соответствует изоэнтропийному течению в неподвижных каналах – *соплах*. Тогда из уравнения энергии, приняв на входе в сопло параметры с индексом *0*, а на выходе – *1*, получается:

$$0 = h_1 - h_0 + \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} + 0$$

Или:

$$h_0 - h_1 = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2}$$

Уравнение сохранения энергии

Учитывая выражение для «идеального пара»

$$h = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p \cdot \upsilon$$

можно записать:

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_0 \cdot \upsilon_0 - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot \upsilon_1 = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2}$$

Преобразуя его, получаем окончательно:

$$\frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left(p_0 \cdot \upsilon_0 - p_1 \cdot \upsilon_1 \right)$$

Уравнение сохранения энергии

Таким образом, для частного случая уравнения энергии мы получили почти такую же запись, как итоговое выражение для уравнения сохранения количества движения. Различие будет в том, что у скорости c_1 и у удельного объема υ_1 там был ещё индекс t, обозначавший изоэнтропийное течение, а в последней записи из уравнения энергии индекса t нет. Это означает, что в последнем выражении для получения реальной скорости c_1 в конце процесса расширения газа нам необязательно знать закон изменения удельного объёма от плотности $\upsilon = f\ (p)$ и закон изменения сил сопротивления от линейной координаты $R = f\ (x)$, а достаточно знать только значения энтальпий в начале и в конце процесса.