

Часть 1

Техническая термодинамика

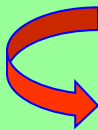
Занятие 6


Термодинамика открытых систем. Уравнение первого закона термодинамики для потока. Истечение из суживающегося сопла. Дросселирование газов и паров.


Термодинамика открытых систем


Обмен массой с окружающей средой!!!

$$q = \Delta u + l$$

 $q_{вне}$
 $ш$

$p_1 v_1 T_1$ 

 $p_2 v_2 T_2$

l_{mex} 

Условие
неразрывности
потока

$$m = \frac{Fv}{v} = const$$

$$q = \Delta u + l$$

Совершаемая работа:

$$l = l_{вт} + l_{выт} + l_{тех} + l_{к} + l_{тр}$$

$$l_{вт} = -p_1 v_1$$

$$l_{выт} = p_2 v_2$$

$$l_{к} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

$$q = q_{внешн} + q_{тр}$$

$$q_{\text{внешн}} + q_{\text{тр}} = u_2 - u_1 + p_2 v_2 - p_1 v_1 + l_{\text{тех}} + l_{\text{тр}} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

$$q_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} \quad i = u + pv$$

$$q_{\text{внешн}} = i_2 - i_1 + l_{\text{тех}} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

$$dq_{\text{внешн}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

$$q = \Delta u + l$$

Формулировка 1-го закона термодинамики для открытых систем

$$q_{\text{внешн}} = i_2 - i_1 + l_{\text{тех}} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

теплота, подведенная к потоку рабочего тела извне, расходуется на увеличение энтальпии рабочего тела, производство технической работы и увеличение кинетической энергии потока.

$$q_{\text{внешн}} = i_2 - i_1 + l_{\text{тех}} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ:

$$dq_{\text{внешн}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

Применение первого закона термодинамики

$$dq_{\text{внешн}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

Теплообменный аппарат - устройство, в котором теплота от жидкой или газообразной среды передается другой среде без изменения агрегатного состояния

$$l_{\text{тех}} = 0 \quad (c_2^2 - c_1^2) \ll q_{\text{внешн}}$$

$$q_{\text{внешн}} = i_2 - i_1$$

Применение первого закона термодинамики

$$dq_{\text{внешн}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

Тепловой двигатель – машина,
преобразующая теплоту в механическую
энергию

$$q_{\text{внешн}} = 0 \quad (c_2^2 - c_1^2) \ll l_{\text{тех}}$$

$$l_{\text{тех}} = i_2 - i_1$$

Применение первого закона термодинамики

$$dq_{\text{внешн}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

Компрессор – машина, предназначенная для сжатия газа и перемещения его из области низкого в область высокого давления

$$q_{\text{внешн}} = 0 \quad c_2^2 = c_1^2$$

$$l_{\text{тех}} = i_1 - i_2$$

Применение первого закона термодинамики

Сопла и диффузоры

$$dq_{\text{внешн}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

Сопла – специально спрофилированные каналы для разгона рабочей среды и придания потоку определенного направления.

Диффузор – канал, предназначенный для торможения потока и повышения давления.

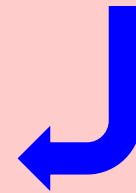
$$l_{\text{тех}} = 0 \quad \begin{array}{l} dq_{\text{внешн}} = di + \frac{dc^2}{2} \\ dq_{\text{внешн}} = di - vdp \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \right. \frac{dc^2}{2} = -vdp$$

При адиабатном процессе истечения:

$$q_{\text{внеш}} = 0 \quad \longrightarrow$$

$$dq_{\text{внеш}} = di + dl_{\text{тех}} + \frac{dc^2}{2}$$

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = i_1 - i_2$$



Ускорение потока происходит за счет уменьшения энтальпии

Истечение из суживающегося сопла

Скорость истечения из сопла (м/с):

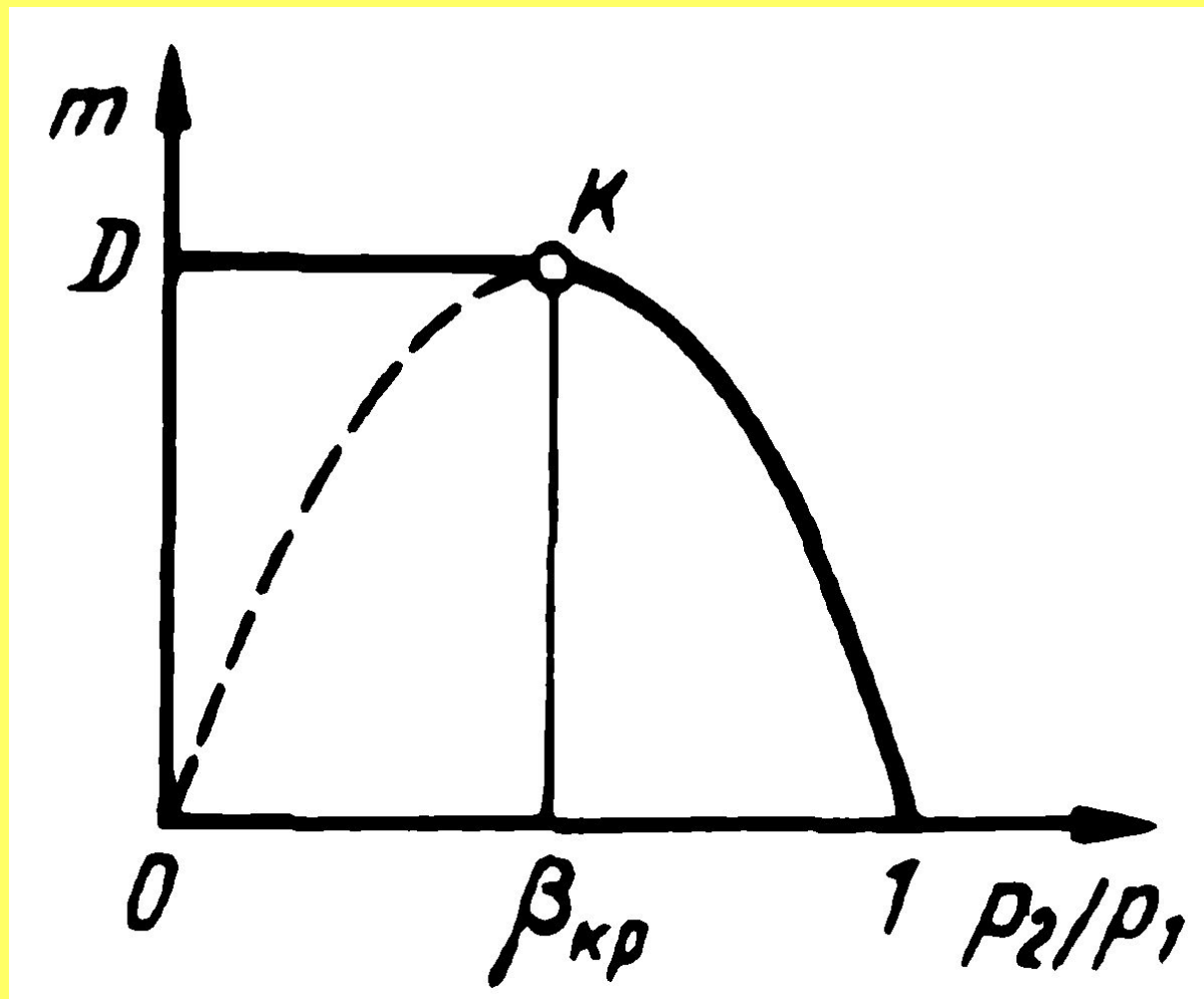
$$c_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

Массовый расход газа через сопло (кг/с):

$$m = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}$$

Строим кривую:

Истечение из суживающегося сопла



Истечение из суживающегося сопла

ГИПОТЕЗА А. СЕН-ВЕНАНА (1839):

В суживающемся сопле невозможно получить давление газа ниже некоторого критического значения $\beta_{кр}$, соответствующего максимальному расходу газа через сопло.

Как бы мы ни понижали давление среды, куда происходит истечение газа, давление на выходе из сопла остается постоянным и равным $p_{кр}$.

Истечение из суживающегося сопла

Критическая скорость:

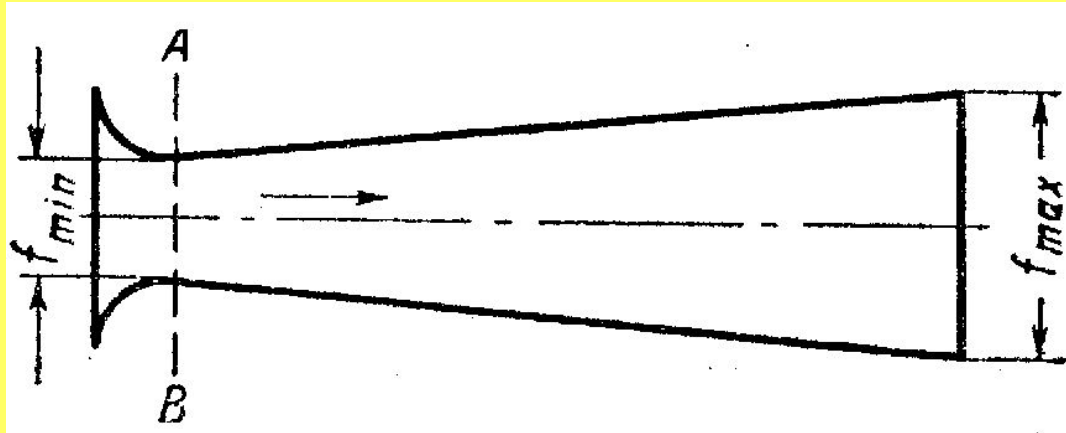
$$c_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1}$$

Максимальный расход:

$$M_{\max} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{k}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{v_1}}$$

Истечение из суживающегося сопла

Для получения сверхкритических скоростей используется сопло ЛАВАЛЯ



$$f_{\min} = \frac{M_{\max} v_{кр}}{c_{кр}} M^2$$

$$f_2 = f_{\min} \frac{c_{кр} v_2}{c v_{кр}}$$

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Дросселирование газов и паров

Дросселирование – процесс уменьшения давления без совершения внешней работы и без теплообмена при прохождении потока через сопротивления или препятствия (клапаны, вентили и т. п.).

Эффект Джоуля-Томпсона – изменение температуры при дросселировании потока

$$p = \frac{RT}{v} + \frac{RTb}{v^2} - \frac{2a}{v^2}$$

$$T_{\text{ИНВ}} = 6,75T_{\text{кр}}$$

$$\frac{RTb}{v^2} > \frac{2a}{v^2}$$

$$\frac{RTb}{v^2} < \frac{2a}{v^2}$$

$$\frac{RTb}{v^2} = \frac{2a}{v^2}$$

Дросселирование газов и паров

$$T_{\text{кр}}^{H_2} = 32 \quad T_{\text{ИНВ}}^{H_2} = 216 \quad \text{К} \quad (-57 \text{ }^\circ\text{C}),$$

$$T_{\text{кр}}^{He} = 5 \quad T_{\text{ИНВ}}^{He} = 34 \quad \text{К} \quad (-239 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Для обычных газов эффект Джоуля-Томпсона положителен и определяется по формуле Ноэля:

$$\alpha_i = (a - bp) \left(\frac{273}{T} \right)^2$$

Располагаемая работа

Запишем для теплового двигателя:

1-й закон $dq_{\text{внешн}} + dq_{\text{тр}} = di - vdp$

ТД: $dq_{\text{внешн}} = di - vdp - dq_{\text{тр}}$

Используем 1-й закон ТД для потока:

$$di + dl_{\text{мех}} + \frac{dc^2}{2} = di - vdp - dq_{\text{тр}}$$

Вырази

м:

$$-vdp = dl_{\text{мех}} + dq_{\text{тр}} + \frac{dc^2}{2}$$

Располагаемая работа

Проинтегрируем полученное

выражение:

$$\int_{P_2}^{P_1} v dp = l_{mex} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + l_{mp}$$

