

$$l = R \cdot (T_1 - T_2) / (n - 1); \quad (4.25)$$

$$l = R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1/v_2)^{n-1}] / (n - 1); \quad (4.26)$$

$$l = R \cdot T_2 \cdot [1 - (P_2/P_1)^{(n-1)/n}] / (n - 1). \quad (4.27)$$

Теплота процесса:

$$q = c_n \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.28)$$

где $c_n = c_v \cdot (n - \lambda) / (n - 1)$ – массовая теплоемкость (4.29) политропного процесса.

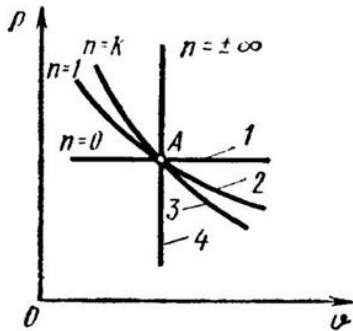


Рис. 4.5. Политропные процессы идеального газа:

1 – изобара, 2 – изотерма, 3 – адиабата, 4 – изохора

Тема 5. Термодинамика потока.

5.1. Первый закон термодинамики для потока.

На практике при рассмотрении рабочих процессов машин, аппаратов и устройств, встречаются задачи изучения закономерностей движения рабочих тел (газов, пара и жидкостей).

Уравнение 1-го закона термодинамики для потока газа при следующих допущениях:

- движение газа по каналу установившееся и неразрывное;
- скорости по сечению, перпендикулярному оси канала, постоянны;
- пренебрегается трение частичек газа друг другу и о стенки канала;
- изменение параметров по сечению канала мало по сравнению их абсолютными значениями,

имеет вид:

$$q = \Delta u + \Delta e + I_{\text{прот.}} + I_{\text{техн.}}, \quad (5.1)$$

где $\Delta e = (w_2^2 - w_1^2)/2 + g \cdot (z_2 - z_1)$ – изменение энергии системы, состоящий из изменения кинетической и потенциальной энергий;
 w_1, w_2 – скорости потока в начале и в конце канала;
 z_1, z_2 – высота положения начала и конца канала.

1. $I_{\text{прот.}} = P_2 \cdot v_2 - P_1 \cdot v_1$ – работа проталкивания, затрачиваемая на движения потока;
2. $I_{\text{техн.}}$ – техническая (полезная) работа (турбины, компрессора, насоса, вентилятора и т.д.).
3. $q = (u_2 - u_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g \cdot (z_2 - z_1) + P_2 \cdot v_2 - P_1 \cdot v_1 + I_{\text{техн.}} \quad (5.2)$

Введем понятия энтальпии, который обозначим через величину:

$$h = u + P \cdot x, \quad (5.3)$$

$$h_2 = u_2 + P_2 \cdot v_2; \quad h_1 = u_1 + P_1 \cdot v_1. \quad (5.4)$$

Тогда уравнение 1-го закона термодинамики для потока газа будет иметь вид:

$$q = h_2 - h_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g \cdot (z_2 - z_1) + I_{\text{техн.}} \quad (5.5)$$

5.2. Критическое давление и скорость. Сопло Лавая.

Если перемещение газа по каналу происходит его расширение с уменьшением давления и увеличением скорости, то такой канал называется соплом.

Если в канале происходит сжатие рабочего тела с увеличением его давления и уменьшением скорости, то такой канал называют диффузором.

В каналах при небольшой разности давлений газа и внешней среды скорость течения рабочего тела достаточно большая. В большинстве случаев длина канала небольшая и процесс теплообмена между стенкой и газом незначителен, поэтому процесс истечения газа можно считать адиабатным.

Скорость истечения (на выходе канала) определяется из уравнения:

$$w = w_2 = v \sqrt{2(h_1 - h_2)}. \quad (5.6)$$

или

$$w = v \sqrt{2 \gamma / (\gamma - 1) \cdot P_1 \cdot x_1 [1 - (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}]}. \quad (5.7)$$

Массовый секундный расход газа, [кг/с]:

$$m = f \cdot w / x_2, \quad (5.8)$$

где: f – площадь сечения канала на выходе.

Так как процесс истечения адиабатный, то:

$$m = f \cdot \sqrt{2 \gamma / (\gamma - 1) \cdot P_1 / x_1 \cdot [(P_2/P_1)^{2/\gamma} - (P_2/P_1)^{(\gamma+1)/\gamma}]}. \quad (5.9)$$

Массовый секундный расход идеального газа зависит от площади выходного канала, начального состояния газа и степени его расширения.

Критическим давлением называется такое давление на выходном сечении канала, при котором достигается максимальный расход газа и определяется следующим выражением:

$$P_K = P_2 = \beta_K \cdot P_1, \quad (5.10)$$

где: $P_K = (2/(\gamma + 1))^{\gamma/(\gamma-1)}$.

для одноатомных газов: $\gamma = 1,66$ $\theta \beta_K = 0,49$;

для двухатомных газов: $\gamma = 1,4$ $\theta \beta_K = 0,528$;

для трехатомных газов: $\gamma = 1,3$ $\theta \beta_K = 0,546$.

Критической скоростью называется скорость газа в выходном сечении канала, при давлении равном или меньшем критического - P_K .

$$w_K = \sqrt{2 \gamma / (\gamma + 1) \cdot P_1 \cdot x_1}. \quad (5.11)$$

Критическая скорость зависит при истечении идеального газа только от начальных параметров, его природы и равна скорости звука газа (a) при критических параметрах.

$$w_K = a = \sqrt{\gamma \cdot P_K \cdot x_K}. \quad (5.12)$$

Комбинированное сопло Лавая предназначено для использования больших перепадов давления и для получения скоростей истечения, превышающих критическую или скорость звука. Сопло Лавая состоит из короткого суживающегося участка и

расширяющейся конической насадки (Рис.5.1). Опыты показывают, что угол конусности расширяющейся части должен быть равен $\alpha = 8-12^\circ$. При больших углах наблюдается отрыв струи от стенок канала.

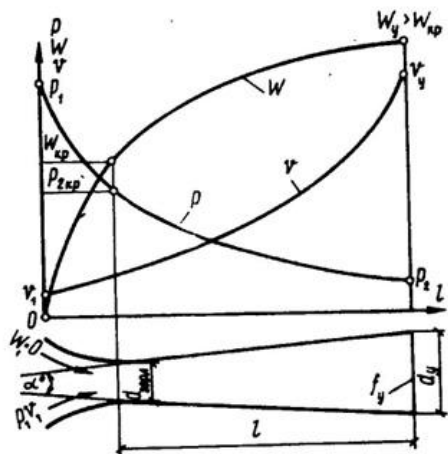


Рис. 5.1. Графики изменения ρ , w , v при истечении через комбинированное сопло

Скорость истечения и секундный расход идеального газа определяются по формулам (5.7) и (5.9).

Длину расширяющейся части сопла можно определить по уравнению:

$$l = (D - d) / 2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi/2), \quad (5.13)$$

где: φ - угол конусности сопла;

D - диаметр выходного отверстия;

d - диаметр сопла в минимальном сечении.

5.3. Дросселирование.

Дросселированием называется явление, при котором пар или газ переходит с высокого давления на низкое без совершения внешней работы и без подвода или отвода теплоты. Такое явление происходит в трубопроводе, где имеется место сужения проходного канала (Рис.5.2). При таком сужении, вследствие сопротивлений, давление за местом сужения - P_2 , всегда меньше давления перед ним - P_1 .

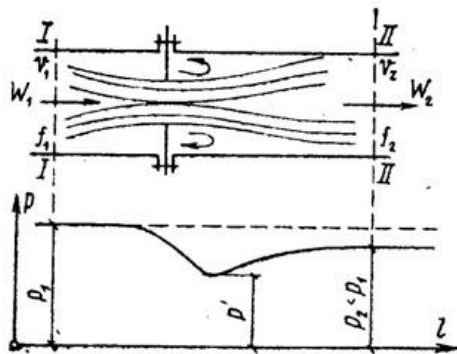


Рис. 5.2. К вопросу о дросселировании газов

Любой кран, вентиль, задвижка, клапан и прочие местные сопротивления, уменьшающие проходное сечение трубопровода, вызывают дросселирования газа или пара,

следовательно падения давления. В большинстве случаев это явление приносит безусловный вред. Но иногда оно является необходимым и создается искусственно (регулирование паровых двигателей, в холодильных установках, в приборах для измерения расхода газа и т.д.).

При прохождении газа через отверстие, кинетическая энергия газа и его скорость в узком сечении возрастают, что сопровождается падением температуры и давления.

Газ, протекая через отверстие, приходит в вихревое движение. Часть его кинетической энергии затрачивается на образование этих вихрей и превращается в теплоту. Кроме того, в теплоту превращается и работа, затраченная на преодоление сопротивлений (трение). Вся эта теплота воспринимается газом, в результате чего температура его изменяется (уменьшается или увеличивается).

В отверстии скорость газа увеличивается. За отверстием газ опять течет по полному сечению и скорость его вновь понижается. А давление увеличивается, но до начального значения оно не поднимается; некоторое изменение скорости произойдет в связи с увеличением удельного объема газа от уменьшения давления.

Дросселирование является необратимым процессом, при котором происходит увеличение энтропии и уменьшение работоспособности рабочего тела.

Уравнением процесса дросселирования является следующее уравнение:

$$i_1 = i_2 \quad (5.14)$$

Это равенство показывает, что энтальпия в результате дросселирования не изменяется и справедливо только для сечений, достаточно удаленных от сужения.

Для идеальных газов энтальпия газа является однозначной функцией температуры.

Отсюда следует, что при дросселировании идеального газа его температура не изменяется ($T_1 = T_2$).

При дросселировании реальных газов энтальпия газа остается постоянной, энтропия и объем увеличиваются, давление падает, а температура изменяется (увеличивается, уменьшается или остается неизменной).

Изменение температуры жидкостей и реальных газов при дросселировании называется эффектом Джоуля-Томсона. Для идеального газа эффект Джоуля-Томсона равен нулю.

Различают дифференциальный температурный эффект, когда давление и температура изменяются на бесконечно малую величину, и интегральный температурный эффект, при котором давление и температура изменяются на конечную величину.

Дифференциальный температурный эффект обозначается - б:

$$\alpha = (\partial T / \partial P)_i \quad (5.15)$$

Интегральный температурный эффект определяется из следующего уравнения:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \int [T \cdot (\partial v / \partial T)_p - v] / c_p dP \quad (5.16)$$

Для реальных газов $\Delta T \neq 0$ и может иметь положительный или отрицательный знак.

Состояние газа, при котором температурный эффект меняет свой знак, называется точкой инверсии, а температура, соответствующая этой точке, называется температурой инверсии - $T_{инв}$.

$$T_{инв} = v \cdot (\partial T / \partial v)_p \quad (5.17)$$