

План лекции:

1. Дросселирование. Эффект Джоуля – Томсона.
2. Дросселирование идеального и реальных газов. Точка инверсии.
3. Частные случаи дросселирования газов (жидкостей)
4. Вопросы для дистанционного освоения лекции

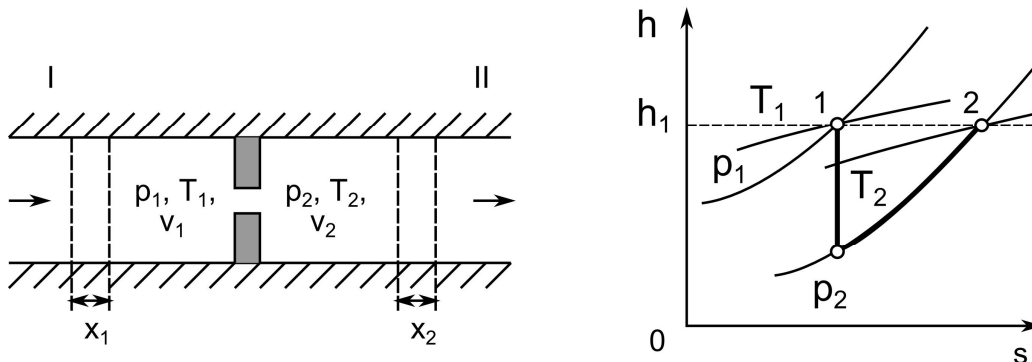
1. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ. ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ – ТОМСОНА.

Из опыта известно, что если на пути струи газа или жидкости, протекающей по трубе или какому-либо другому каналу, встречается препятствие, приводящее к внезапному резкому сужению поперечного сечения струи, а затем сечение струи увеличивается, то давление протекающего газа (жидкости) за препятствием всегда оказывается меньшим, чем перед ним. Такое препятствие называют **местным сопротивлением**.

Эффект падения давления струи рабочего тела в процессе протекания через сужения в канале называют дросселированием, или мятием.

С процессом дросселирования приходится часто сталкиваться на практике, например при движении воды через неполностью открытый водопроводный кран.

Физически падение давления за местным сопротивлением обусловлено диссипацией энергии потока, расходуемой на преодоление этого местного сопротивления.



Рассмотрим процесс течения газа (жидкости) через трубу, имеющую местное сопротивление, например диафрагму. Сечение трубы до и после диафрагмы считаем одинаковым. Скорость потока до и после диафрагмы считаем пренебрежимо малой; это позволяет пренебречь значением кинетической энергии потока по сравнению с его энтальпией. Считаем, что стенки трубы окружены идеальной теплоизоляцией, исключаяющей теплообмен с окружающей средой. Рассмотрим так называемое **адиабатное дросселирование**.

Рассмотрим массу газа, заключенного в данный момент между сечениями I (до местного сопротивления) и II (за сопротивлением). Поскольку газ движется, то, естественно, зафиксированные нами сечения газа (или невесомые поршни) I и II перемещаются вдоль трубы. Площадь сечения трубы, т. е. площадь сечения этих условных поршней, обозначим F . Давление, удельный объем и температуру газа до диафрагмы обозначим P_1, T_1, v_1 и после диафрагмы - P_2, T_2, v_2 .

За некоторый промежуток времени поршень I переместится вдоль трубы на расстояние x_1 поршень II - на расстояние x_2 ; поскольку давление и плотность газа за

диафрагмой меньше, чем перед диафрагмой, очевидно, $x_2 > x_1$. Для того чтобы переместить поршень I на расстояние x_1 нужно совершить работу, равную:

$$L_1 = p_1 x_1 F = p_1 V_1 = p_1 v_1 G \quad (1)$$

Аналогично: $L_2 = p_2 x_2 F = p_2 V_2 = p_2 v_2 G$. Здесь V, G - объём газа вытесняемый поршнями и расход газа через канал, соответственно.

При перемещении рассматриваемой нами фиксированной массы газа за определенный промежуток времени совершается работа, равная разности работы L_2 , которую производит поршень II, и работы L_1 , которая производится над поршнем I:

$$L = (p_2 v_2 - p_1 v_1) G \quad (2)$$

Мы рассматриваем адиабатное дросселирование, а в соответствии с первым началом термодинамики работа в адиабатном процессе может быть произведена только за счет уменьшения внутренней энергии системы. Следовательно,

$$L = (u_1 - u_2) G \quad (3)$$

Приравнивая уравнения (2) и (3), получим: $p_2 v_2 - p_1 v_1 = u_1 - u_2$, откуда можно записать:

$$\boxed{h_1 = h_2} \quad (4)$$

Мы получили важный вывод – в результате адиабатного дросселирования значения энтальпий рабочего тела до местного сопротивления и после него одинаковы.

Мы рассматриваем здесь состояния дросселируемого вещества до дросселя и за дросселем. Следует заметить, что при течении газа (жидкости) внутри дросселя энтальпия газа (жидкости) может изменяться; в самом деле, поскольку дроссель или другое местное сопротивление представляет собой сужение проходного сечения трубы, при протекании через дроссель газ (жидкость) ускоряется, его кинетическая энергия возрастает и, следовательно, энтальпия уменьшается. После того как за дросселем сечение потока газа (жидкости) снова возрастает, поток замедляется (тормозится), его кинетическая энергия уменьшается и энтальпия увеличивается до прежнего значения.

Как было отмечено, **дросселирование представляет собой существенно необратимый процесс**. Если представить процесс дросселирования идущим в обратном направлении (например, в трубе, изменить направление течения газа на обратное), то он по-прежнему будет сопровождаться падением давления при протекании газа через местное сопротивление (дроссель). Поскольку процесс дросселирования явно необратим, энтропия газа (жидкости) в процессе дросселирования возрастает ($ds > 0$). Разумеется, в различных видах процесса дросселирования, отличающихся друг от друга различной теплотой, подводимой к газу в процессе дросселирования, прирост энтропии различен.

Приступая к вычислению изменения энтропии в процессе дросселирования, следует сделать одно существенное замечание. Дифференциальные уравнения термодинамики, которые мы будем использовать для вычисления изменения энтропии, температуры и других параметров вещества при адиабатном дросселировании, применимы, только для обратимых процессов. Поэтому для того чтобы иметь возможность воспользоваться этими уравнениями для расчета изменения состояния газа (жидкости) в необратимом процессе адиабатного дросселирования от состояния 1 до состояния 2, мы должны предварительно подобрать схему обратимого процесса, переводящего рассматриваемый газ (жидкость) из того же исходного состояния 1 (перед дросселем) в то же конечное состояние 2 (за

дросселем). Изменение энтропии будет подсчитано для этого обратимого процесса, но поскольку энтропия является функцией состояния, разность энтропий газа (жидкости) в состояниях 1 и 2 будет такой же и для интересующего нас процесса дросселирования.

Изменение энтропии газа в результате осуществления этого обратимого процесса (равное изменению энтропии при дросселировании газа от состояния 1 до состояния 2) определяется следующим соотношением:

$$s_2(h, p_2) - s_1(h, p_1) = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_h dp = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{v}{T} dp \quad (5)$$

Перейдем теперь к вопросу о том, как меняется температура газа или жидкости в процессе **адиабатного дросселирования**. Поскольку процесс характеризуется условием $h = \text{const}$, для решения этого вопроса нужно знать значение производной $\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$.

Из очевидного соотношения $\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \left(\frac{\partial p}{\partial h} \right)_T \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = -1$ следует:

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \quad (6)$$

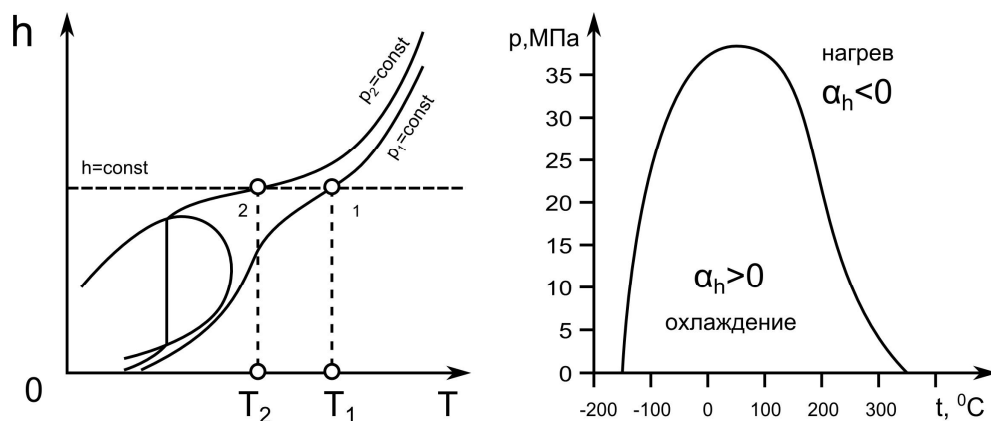
Величину α_h называют **коэффициентом адиабатного дросселирования, эффектом Джоуля-Томсона или дифференциальным дроссель-эффектом**.

Измеряя дифференциальный дроссель-эффект, можно построить h, T – диаграмму исследуемого вещества, определить теплоемкость c_p , калорические функции, удельный объем и т.д.

Изменение температуры газа (жидкости) в процессе адиабатного дросселирования при значительном перепаде давления на дросселе называют **интегральным дроссель-эффектом**; он вычисляется из соотношения:

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp \quad (7)$$

где T_1, T_2 – температуры дросселируемого вещества соответственно перед дросселем и за ним.



Интегральный дроссель-эффект может достигать весьма большого значения. Например, при адиабатном дросселировании водяного пара от давления 29 400 кПа и

температуры 450°C до давления 98 кПа температура пара уменьшается до 180°C (т.е. на 270°C).

Определение интегрального адиабатного дроссель-эффекта удобно выполнять с помощью h, T - диаграммы дросселируемого вещества. Если известно состояние газа (жидкости) перед дросселем, т.е. его давление p_1 и температура T_1 и известно давление за дросселем p_2 , то, найдя точку пересечения изоэнтальпы $h = \text{const}$ с изобарой $p_2 = \text{const}$, получим температуру за дросселем T_2 .

2. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ИДЕАЛЬНОГО И РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТОЧКА ИНВЕРСИИ.

Знак адиабатного дроссель-эффекта или, иными словами, будет ли газ (жидкость) нагреваться или охлаждаться при дросселировании определяется числителем выражения (6): $T(\partial v/\partial T)_p - v$. Очевидно, что если $(\partial v/\partial T)_p < v/T$, то $\alpha_h < 0$, и тогда в процессе адиабатного дросселирования температура дросселируемого вещества возрастает. Если $(\partial v/\partial T)_p > v/T$, то $\alpha_h > 0$, и тогда температура снижается. Если $(\partial v/\partial T)_p = v/T$, то температура газа или жидкости не изменяется.

Поскольку для идеального газа $(\partial v/\partial T)_p = v/T$, **идеальный газ дросселируется без изменения температуры**. Это один из характерных признаков идеального газа. Таким образом, эффект Джоуля - Томсона имеет место только для реальных газов и жидкостей. Рассчитав производную для газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса можно убедиться, что эффект Джоуля - Томсона не равен нулю.

Как показывает опыт, для одного и того же вещества знак α_h оказывается различным в различных областях состояния. Состояние газа (жидкости), в котором α_h равно нулю, называют **точкой инверсии** эффекта Джоуля - Томсона. **Геометрическое место точек инверсии на диаграмме состояния данного вещества называют кривой инверсии**.

Точки на кривой инверсии удовлетворяют условию $\alpha_h = 0$. Пользуясь этим условием, можно найти кривую инверсии с помощью уравнения состояния вещества.

В качестве примера на рисунке приведена кривая инверсии азота в p, T - диаграмме. Внутри области, ограниченной кривой инверсии, $\alpha_h > 0$, т.е. газ при дросселировании охлаждается. Вне этой области $\alpha_h < 0$, т.е. температура газа при дросселировании повышается. Аналогичный характер имеют кривые инверсии других веществ.

3. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВ (ЖИДКОСТЕЙ)

Адиабатное дросселирование может быть использовано в качестве эффективного способа охлаждения газов. Разумеется, газ будет охлаждаться только в том случае, когда его состояние находится в той области состояний, в которой $\alpha_h > 0$, т.е. в области под кривой инверсии.

Известно, что эффективным способом охлаждения газов является также процесс обратимого адиабатного, т.е. изоэнтропного, расширения (с отдачей внешней работы). Представляет интерес сравнение этих двух способов охлаждения газов. Выясним, какой из этих двух способов обеспечивает большее понижение температуры. Иными словами, нужно сравнить между собой величины $(\partial T/\partial p)_h$ и $(\partial T/\partial p)_s$.

Производная $(\partial T/\partial p)_s$, которая может быть названа **коэффициентом обратимого адиабатного (изоэнтропного) расширения** и по аналогии с α_h обозначена α_s , может быть представлена в следующем виде: из соотношения $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = -1$ следует:

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}{c_p}. \quad (8)$$

Из соотношений (6) и (8) можно получить:

$$\alpha_s - \alpha_h = \frac{v}{c_p}. \quad (9)$$

Поскольку v и c_p всегда больше нуля, то $\alpha_s > \alpha_h$. Таким образом, процесс обратимого адиабатного расширения (с отдачей внешней работы) обеспечивает более эффективное с точки зрения термодинамики охлаждение газа или жидкости, чем процесс адиабатного дросселирования, т.е. необратимого адиабатного расширения.

Адиабатное дросселирование является одним из частных случаев процессов дросселирования, которые различаются теплотой, подводимой к веществу в процессе дросселирования. Понятно, что если имеет место подвод или отвод теплоты через стенки трубы в процессе дросселирования, то условие изоэнтальпийности, справедливое для адиабатного дросселирования, не выполняется и энтальпия газа (жидкости) изменяется. Интересным частным случаем процесса дросселирования является изотермическое дросселирование.

Изотермическим дросселированием называют такой процесс дросселирования, в котором к дросселируемому газу (жидкости) подводится такое количество теплоты, чтобы температура газа за дросселем оставалась равной температуре перед дросселем. Изотермическое дросселирование применяется главным образом в теплофизических экспериментах. **Коэффициент изотермического дросселирования (изотермический дроссель-эффект)**, обозначенный α_T , определяется следующим образом:

$$\alpha_T = -\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \quad (10)$$

В заключение отметим, что удельный объем вещества в процессе дросселирования всегда увеличивается; в самом деле, как известно, величина $(\partial p/\partial v)_T$ всегда отрицательна; нетрудно показать, что величина $(\partial p/\partial v)_h$ также всегда отрицательна. Отрицательные значения этих производных свидетельствуют о том, что при снижении давления вещества при дросселировании ($dp < 0$) удельный объем возрастает ($dv > 0$).

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. Дайте определение дросселирования.
Ответ:
2. Какая термодинамическая функция имеет одинаковое значение до и после местного сопротивления при адиабатном дросселировании?
Ответ:
3. Запишите формулу, определяющую коэффициент адиабатного дросселирования.
Ответ:
4. Что называют точкой или кривой инверсии эффекта Джоуля-Томсона?
Ответ:
5. Запишите связь между изменением температуры при изоэнтропном (обратимом) расширении газа в канале и изменением температуры при адиабатном необратимом расширении газа (дросселировании).
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: