

Лабораторная работа № 4
ИЗУЧЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ГАЗА
(Эффект Джоуля-Томсона)

Цель работы. Целью лабораторной работы является экспериментальное изучение эффекта Джоуля-Томсона: определение коэффициента Джоуля-Томсона, определение постоянной a в уравнении Ван-дер-Ваальса.

Устройство и принцип работы

Схема экспериментальной установки приведена на Рис. 1-3. На передней панели находится двухканальный измеритель температуры (6) типа 2ТРМО, подключённый к двум хромель-копелевым термопарам t_1 и t_2 (Рис. 1 и Рис. 2), манометр 5 для измерения давления воздуха на входе в дроссель, ротаметр 4 для измерения объёмного расхода воздуха, кран K_1 для регулирования давления воздуха на входе в дроссель.

На Рис.2 приведена схема рабочего участка. Цилиндрическая гильза (8) из текстолита, запрессованная в дюралевую оболочку (9), заполнена уплотнённым войлоком (10). Плотность войлока регулируется накидной гайкой (11). Со стороны высокого давления вводится ХК-термопара t_1 , а со стороны низкого давления – t_2 . Вывод термоэлектрических проводов к измерителю температуры 2ТРМО осуществляется через уплотнения (12) и (13). Гильза с войлоком находится в теплоизоляции (14).

На Рис.3 приведена пневматическая схема установки. Компрессор (15) подаёт сжатый воздух в дроссель (18) через сепаратор (16) и холодильник (17). При этом краном K_1 регулируется давление P_1 воздуха на входе дросселя и расход воздуха.

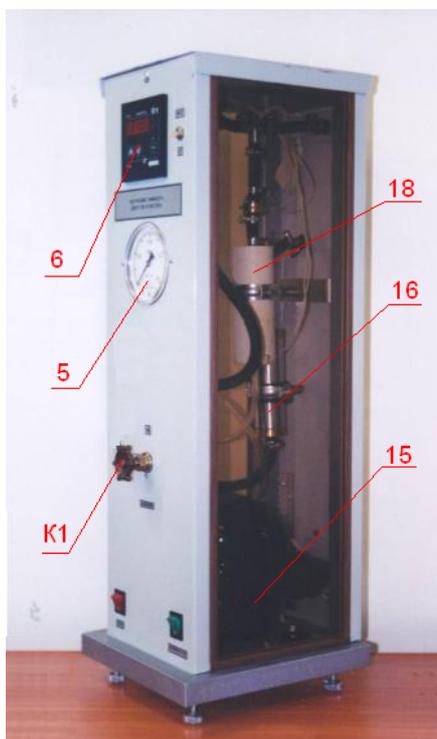


Рис. 1

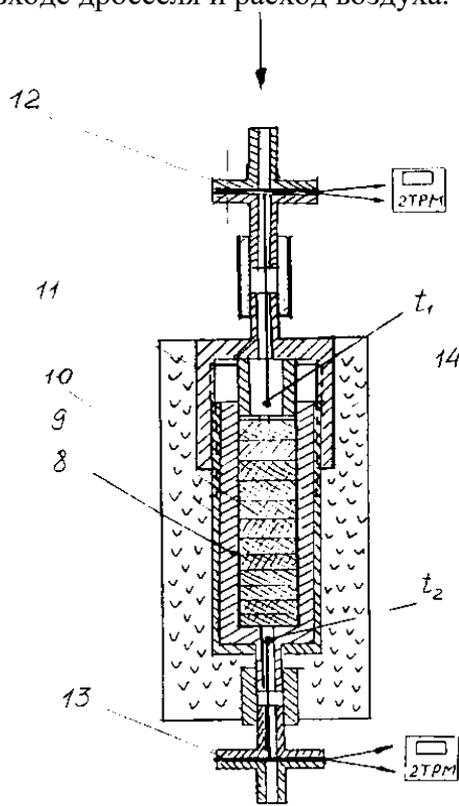


Рис. 2

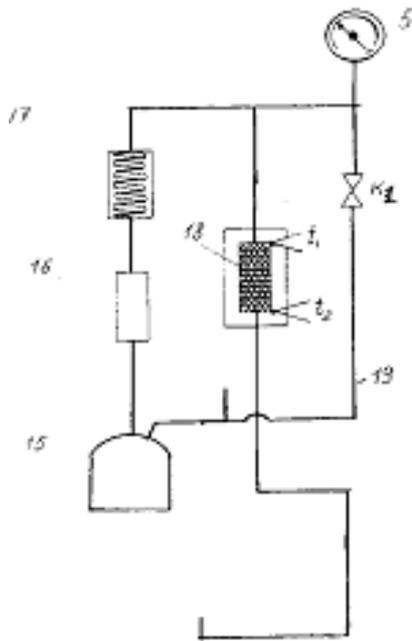


Рис. 3

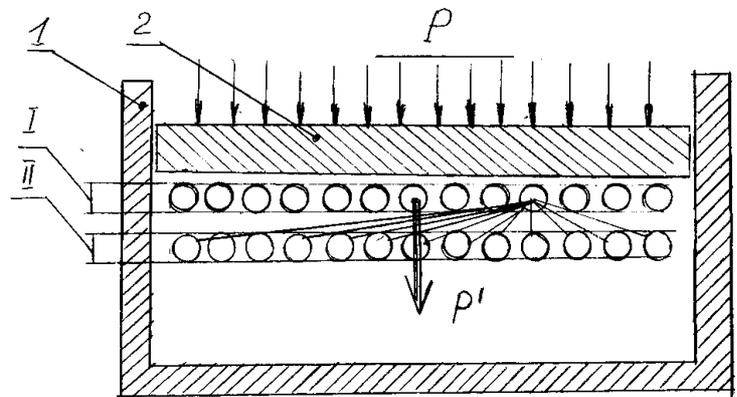


Рис.4

Принцип работы установки:

В опыте Джоуля и Томсона цилиндрическая трубка, окруженная теплоизолирующим веществом, разделяется на две части с помощью пробки из плотного материала (вата или очесы шелка). Схема опыта представлена на рисунке 1. Исследуемый газ под действием разности давлений медленно перетекает через пробку. Благодаря наличию пробки газ течет без турбулентности. Это позволяет пренебречь кинетической энергией газа как величиной, пропорциональной квадрату скорости. Наличие тепловой защиты делает процесс адиабатическим. Давление газа P_1 и P_2 по обе стороны от пробки поддерживается постоянным. Пробка и газ обмениваются теплом до тех пор, пока процесс не становится стационарным, после этого физическое состояние пробки, а значит и ее внутренняя энергия, остается неизменным. При стационарном течении газа по одну сторону пробки устанавливалась температура t_1 , по другую - температура t_2 . Стационарное течение газа через пробку называется процессом Джоуля-Томсона, а изменение температур при таком течении эффектом Джоуля-Томсона.

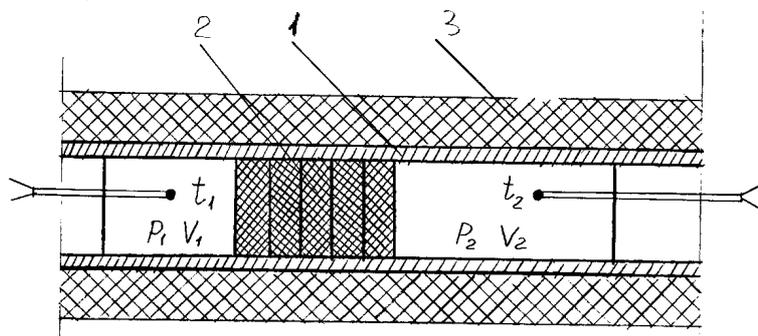


Рис. 5

Схема течения воздуха через дроссель с пористой перегородкой приведена на Рис.1. Текстолитовая гильза (1) в которой находится пористая перегородка (2) окружена слоем теплоизолятора (3). Проходя через пористую перегородку за время τ , некоторое количество газа совершит работу:

$$A = P_2 V_2 - P_1 V_1, \quad (1)$$

где: P_1, V_1 – давление и объём некоторого количества газа со стороны высокого давления до перетекания через перегородку; P_2, V_2 – давление и объём того же количества газа со стороны низкого давления после его перетекания через перегородку. Эта работа затрачивается на преодоление местного сопротивления, превращаясь в теплоту.

Считая, что процесс перетекания газа через пористую перегородку происходит без теплообмена с окружающей средой, применим первый закон термодинамики:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + A = 0 \\ \Delta U &= -A, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta U = U_1 - U_2$ – изменение внутренней энергии газа.

Подставляя (1) в (2), получим:

$$U_1 + P_1 V_1 = U_2 + P_2 V_2 \quad (3)$$

Соотношение (3) показывает, что в результате адиабатного дросселирования значения энтальпий рабочего тела до и после местного сопротивления одинаковы.

Для дальнейшего использования формулы (3) необходимо определить уравнение состояния реального газа.

Известно, что неточность законов идеального газа объясняется существованием межмолекулярных сил, которыми пренебрегают в модели идеального газа. Из опыта мы знаем, что потенциальную энергию межмолекулярного взаимодействия в реальном газе можно приближенно представить в виде потенциала Ленарда-Джонса:

$$W(r) = \frac{a_1}{r^{12}} - \frac{a_2}{r^6} \quad (3)$$

здесь a_1 и a_2 – положительные константы. Отсюда видно, что на малых расстояниях межмолекулярные силы носят резко отталкивающий характер, а на больших расстояниях – притягивающий.

Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс вывел уравнение состояния реального газа, в котором для учёта особенностей молекулярного взаимодействия ввёл две поправки.

Первая поправка связана с взаимодействием молекул на малых расстояниях, где оно заменяется взаимодействием абсолютно твердых шаров некоторого радиуса r_0 , так что $W(r < 2r_0) = \infty$. Предположим, что N молекул в газе взаимодействуют парами. При столкновении каждой пары, центры двух молекул 1 и 2, изображённые на рис. 1, не могут сблизиться на расстояние меньше $2r_0$. Поэтому для каждой пары молекул не доступный объём равен

$$V_H = \frac{4}{3} \pi d^3. \quad (4)$$

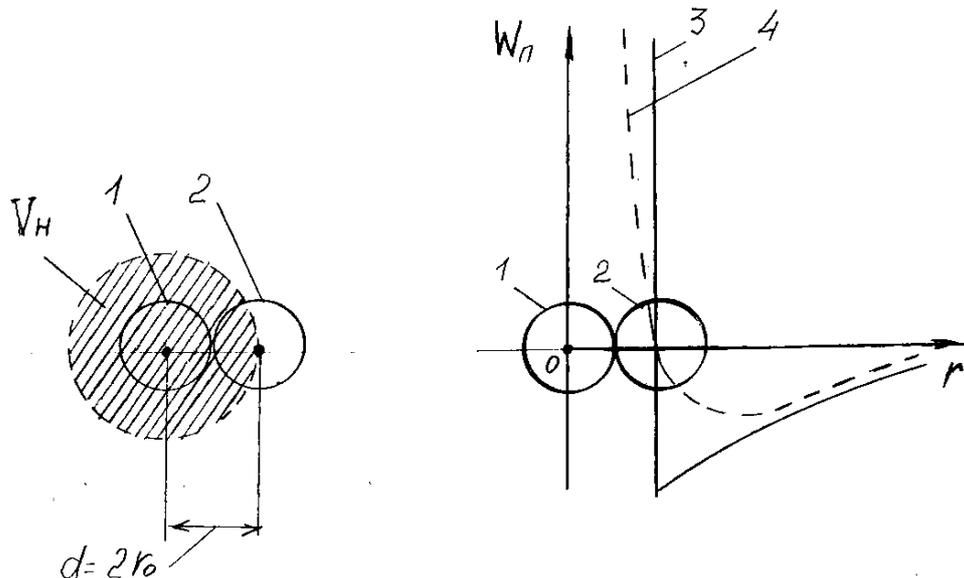


Рис. 6

В этом случае мы имеем идеальный газ, состоящий из $N/2$ взаимодействующих в данный момент времени пар молекул, для которых не доступным объёмом является

$$\sum_0^{N/2} V_H = \frac{N}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi d^3 = 4Nv_0 = b \quad (5)$$

Величина b и есть искомая поправка на не доступный объём.

В этом случае уравнение состояния газа, молекулами которого являются «твёрдые сферы», можно получить из уравнения состояния идеального газа, заменив величину V на $(V-b)$.

$$p(V-b) = \frac{m}{\mu} RT, \quad (6)$$

где величина $(V-b)$ называется «свободным объёмом».

Вторая поправка связана с притягивающим взаимодействием молекул на больших расстояниях, которое приводит к появлению так называемого внутреннего давления газа P' .

Предположим, в цилиндре 1 по невесомым поршнем 2 находится не слишком плотный газ, центры молекул которых находятся на расстояниях $r > 2r_0$, то есть на которых между молекулами действуют силы притяжения. Выделим два слоя молекул (I и II) в которых каждая молекула слоя I взаимодействует по парно со всеми молекулами слоя II (Рис. 4). В этом случае

$$P' \sim n_I n_{II} = \frac{N}{V} \frac{N}{V} = \frac{N^2}{V^2},$$

где $n_I = n_{II}$ - концентрации молекул; N - число молекул в объёме цилиндра V .

Поэтому в уравнение состояния (6) для ν молей газа можно ввести поправку на внутреннее давление P' , которое направлено в ту же сторону что и внешнее давление P :

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V-b) = \frac{m}{\mu} RT \quad (7)$$

Для одного моля газа уравнение Ван-дер-Ваальса запишем в виде

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V-b) = RT \quad (8)$$

Определить зависимость внутренней энергии газа Ван-дер-Ваальса от объема и температуры можно на основании соотношения для газа в состоянии термодинамического равновесия:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P,$$

откуда с учетом (8) получим:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = \frac{a}{V^2},$$

$$U = -\frac{a}{V} + f(T),$$

где $f(T) = \int C_V(T) dT \approx C_V T$ - «постоянная интегрирования», которая может зависеть от температуры. Здесь мы не учитываем зависимость C_V от температуры. Таким образом, внутренняя энергия одного моля газа Ван-дер-Ваальса равна:

$$U = C_V T - \frac{a}{V}. \quad (10)$$

Используем выражения (3) и (110) для определения константы Ван-дер-Ваальса для воздуха:

$$C_V T_1 - \nu \frac{a}{V_1} + P_1 \frac{V_1}{\nu} = C_V T_2 - \nu \frac{a}{V_2} + P_2 \frac{V_2}{\nu}.$$

Группируя слагаемые в последнем выражении, получим:

$$C_V (T_2 - T_1) - \nu \left(\frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1} \right) = -\frac{1}{\nu} (p_2 V_2 - p_1 V_1). \quad (11)$$

В соответствии с первым законом термодинамики соотношение (11) можно представить в виде

$$\Delta U = -A,$$

где

$$\Delta U = C_V (T_2 - T_1) - \nu \left(\frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1} \right) \quad \text{и} \quad A = \frac{1}{\nu} (p_2 V_2 - p_1 V_1).$$

Поскольку пористая перегородка состоит из множества каналов, по которым течёт газ, то соотношение (11) относится к элементарному процессу. В последующем процессе тепло, выделяемое в результате трения газа в предыдущем процессе о стенки канала усваивается газом.

Отметим что тепло, выделяемое в результате трения газа в дросселе, полностью переходит (усваивается) в поток и увеличивает внутреннюю энергию газа.

Поэтому для интегрального процесса течения газа величина $A = \frac{1}{\nu} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$ входит в изменение внутренней энергии (т.е. в правую часть уравнения (11)).

Следовательно, соотношение (11) для адиабатного течения газа через пористую перегородку можно записать в виде:

$$C_V (T_2 - T_1) - \nu \left(\frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1} \right) = 0 \quad (12)$$

Заметим, что величины температур и объёмов входящие в уравнение (12) отличаются от аналогичных значений в уравнении (11).

Из (12) найдём постоянную a .

$$a = \frac{1}{\nu} \left(\frac{V_1 V_2}{V_2 - V_1} \right) [C_V (T_1 - T_2)], \quad (13)$$

В случае течения газа через пористую перегородку процесс можно считать достаточно медленным адиабатным процессом. Поэтому применим для связи параметров газа до и после пористой перегородки уравнение адиабаты:

$$p_1 V_2^\gamma = p_2 V_1^\gamma, \quad (14)$$

где γ - показатель адиабаты.

Для воздуха

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} = \frac{7}{5} = 1,4$$

Из (13) и (14) окончательно получим формулу для расчёта коэффициента a :

$$a = \frac{R \cdot T_1}{P_1} \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{5}{7}}} \right] \cdot C_V \cdot (T_1 - T_2)$$

Пример расчёта.

Средние значения опытных данных: $P_1 = 5 \cdot 10^5$ Па; $T_1 = 300$ К; $P_2 = 1 \cdot 10^5$ Па; $T_2 = 299,72$ К;

Справочные значения для воздуха: $C_V = 20,786$ Дж/(моль·°К); $a = 0,131 \frac{H \cdot M^4}{\text{моль}^2}$

$$a = \frac{8,31 \cdot 300}{5 \cdot 10^5} \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{1}{5} \right)^{\frac{5}{7}}} \right] 20,786 \cdot 0,928 = 0,141 \left(\frac{H \cdot M^4}{\text{моль}^2} \right)$$

Порядок проведения эксперимента и обработка полученных данных.

Измеряемые величины:

P_1 – давление воздуха до пористой перегородки (измеряется манометром (5));

P_2 – давление воздуха за пористой перегородкой (принимается равным атмосферному);

t_1 - температура воздуха до пористой перегородки;

t_2 - температура воздуха за пористой перегородкой;

ротаметра, приведённых в паспорте прибора);

Проведение измерений.

1. Включить установку тумблером «Сеть».
2. Включить измеритель температуры 2ТРМО. Нажатием сенсорной кнопки VV переключить прибор для измерения t_1 или t_2 . Если температура на входе и выходе дросселя одинаковая, то $\Delta t_0 = t_1 - t_2 = 0$.
3. Поворотом против часовой стрелки открыть кран K_1 .
4. Включить тумблером «Компр» компрессор и установить давление на входе в дроссель равное 2-3 Мпа краном К поворотом по часовой стрелке.
5. Через 1-2 минуты произвести отсчет температуры t_1 и t_2 ($\Delta t_{ист} = t_1 - t_2$).
6. Выключить компрессор.
7. Для повторения опыта через, примерно, 1 минуту записать значения t_1 и t_2 (они могут быть не равны) и определить исходную разность температур $\Delta t_0 = t_1 - t_2$
8. Включить компрессор и установить следующее значение давление на входе в дроссель ($P_1 = 5$ Мпа).
9. Через 1-2 минуты произвести отсчет температуры t_1 и t_2 ($\Delta t_2 = t_1 - t_2$).
Истинная разность температур на входе и выходе из дросселя определяется с учётом поправки на исходную разность температур
$$\Delta t_{ист} = \Delta t_2 - \Delta t_0$$
10. Пункты 6-9 повторить для следующего значения давления на входе в дроссель ($P_1 = 7$ Мпа).

Внимание! Повторное включение компрессора производить через 1 минуту с момента его останова.