

## 2.3. Лабораторная работа: «Эффект Джоуля-Томсона»

### 2.3.1. Введение

В данной лабораторной работе рассматриваются процессы, происходящие в жестком замкнутом баллоне при его заполнение воздухом и при выпуске воздуха из него.

### 2.3.2. Цели и задачи лабораторной работы

Целью работы является экспериментальное определение изменения температуры воздуха в процессе адиабатного дросселирования при перепаде давления на дросселе до 12 атмосфер, а также определение константы Ван-дер-Ваальса, применяя для воздуха модель реального газа Ван-дер-Ваальса.

Задачами исследования являются:

- 1) закрепление теоретических знаний по основным свойствам реального газа и отличие их от идеального газа;
- 2) снятие опытных характеристик воздуха в процессе адиабатного дросселирования, проведение обработки экспериментальных данных;
- 3) составление отчета по выполненной работе.

### 2.3.3. Основные теоретические сведения

В 1852-1862 гг. совместно Джоулем и Томсоном был проведен целый ряд экспериментальных работ по исследованию термодинамических свойств газов.

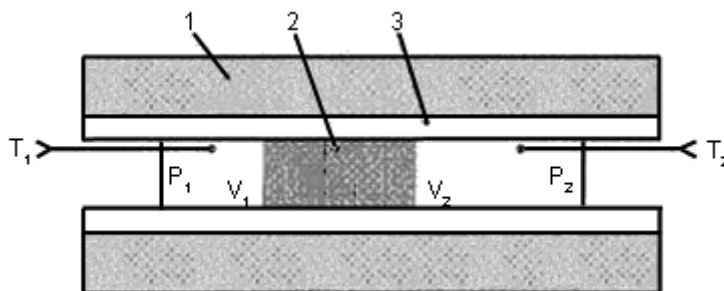


Рис. 2.3.1. Схематическое изображение опыта Джоуля-Томсона: 1 – теплоизолирующая оболочка; 2 – пористая перегородка; 3 – цилиндрическая труба

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 рис.2.3.1. 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.

Применим к эффекту Джоуля-Томсона первое начало термодинамики. Для адиабатического процесса:

$$U_2 - U_1 + A = U_2 + P_2V_2 - (U_1 + P_1V_1) = 0, \quad (2.3.1)$$

Заметим, что из уравнения (2.3.1) следует постоянство энтальпии ( $H=U+PT$ ) в процессе Джоуля-Томсона. Используем это свойство для определения разности температур  $\Delta T$  в процессе Джоуля-Томсона при разности давлений  $\Delta P$ :

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H \approx \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = -\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P} = \frac{T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - V}{C_P}, \quad (2.3.2)$$

Здесь  $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = \alpha$  – коэффициент, учитывающий изменение температуры при адиабатном дросселировании, называемый коэффициентом адиабатного дросселирования или дифференциальный дроссель-эффект.

Для дальнейшего использования формулы (2.3.2) необходимо определить уравнение состояния. Для идеального газа числитель выражения в правой части (2.3.2) обращается в ноль.

Как известно, неточность законов идеального газа объясняется существованием межмолекулярных сил, которыми пренебрегают в модели идеального газа. Из опыта мы знаем, что потенциальную энергию меж-

молекулярного взаимодействия можно приближенно представить в виде потенциала Ленарда-Джонса:

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

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. Для учета этих особенностей молекулярного взаимодействия в модели газа Ван-дер-Ваальса вводят две поправки.

Первая поправка связана с взаимодействием молекул на малых расстояниях, где оно заменяется взаимодействием абсолютно твердых шаров некоторого радиуса  $r_0$ , так что  $W(r < r_0) = \infty$ . Это приводит к тому, что при столкновении центры молекул не могут сблизиться на расстояние меньшее  $2r_0$ . Если в сосуде имеется  $N$  одинаковых молекул, то такую ситуацию можно представить как, если бы половина из этих молекул была заменена неподвижными сферами радиуса  $2r_0$ , а молекулы другой половины были бы точечными и двигались с удвоенной кинетической энергией. Тогда мы бы имели идеальный газ, состоящий из  $N/2$  молекул, находящийся в объеме  $(V-b)$ . Величина  $b$  и есть искомая поправка. Уравнение состояния одного моля такого газа можно записать в виде:

$$P(V - b) = RT, \quad (2.3.3)$$

Где суммарный недоступный объем газа:

$$b = \frac{N_A}{2} \frac{4\pi}{3} (2r_0)^3, \quad (2.3.4)$$

Вторая поправка связана с притягивающим взаимодействием молекул на больших расстояниях, которое приводит к появлению так называемого внутреннего давления газа  $P'$ . Можно показать, что величина  $P'$  будет пропорциональна квадрату концентрации молекул газа (чем больше молекул газа в объеме, тем больше суммарная сила «самопритяжения»). Поэтому уравнение состояния моля такого газа можно записать в виде:

$$\left( P + \frac{a}{V^2} \right) V = RT, \quad (2.3.5)$$

где  $a$  – вторая поправочная величина, представляющая собой некоторую константу, характерную для данного газа.

Объединяя формулы (2.3.3) и (2.3.5), получим уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{V^3}\right)(V - b) = RT \quad (2.3.6)$$



Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс родился в Лейдене. Окончил начальную и среднюю школу в Лейдене. С 1862 по 1865 г. он посещал Лейденский университет как вольнослушатель. Его докторская диссертация, посвященная непрерывности газообразного и жидкого состояний, получила горячее одобрение Дж. К. Максвелла. Через четыре года после получения докторской степени он стал первым профессором физики во вновь организованном Амстердамском университете, где и оставался вплоть до самого ухода в отставку в 1908 г., передав свое дело сыну. Ван-дер-Ваальс получил в 1910 г. Нобелевскую премию по физике «за работу над уравнением состояния газов и жидкостей».

Хотя уравнение Ван-дер-Ваальса и не удовлетворяло полностью экспериментальным данным, оно явилось существенным улучшением более простого закона и обладало важными следствиями.

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 (2.3.6) получим: 
$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = \frac{a}{V^2}, \quad (2.3.7)$$

откуда  $U = \frac{a}{V} + f(T)$ . Тогда для газа Ван-дер-Ваальса получим

$$U = C_V T - \frac{a}{V}, \quad (2.3.8)$$

Используем выражения (2.3.1) и (2.3.8) для определения константы Ван-дер-Ваальса для воздуха:

$$a = \frac{1}{\nu} \frac{V_1 V_2}{V_1 - V_2} \left[ C_V (T_2 - T_1) + \frac{1}{\nu} (P_2 V_2 - P_1 V_1) \right], \quad (2.3.9)$$

Группируя слагаемые в последнем выражении, получим:

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

где  $\nu = \rho_2 V_2 / \mu$  – количество молей воздуха в объеме  $V_2$ ,  $V_1$  – объем того же количества молей  $\nu$  воздуха после перетекания через пористую перегородку.

Вычисления параметра  $a$  можно упростить, для чего в выражении (2.3.9) пренебрегается вторыми слагаемыми в квадратных скобках:

$$a = \frac{1}{\nu} \left( \frac{V_1 V_2}{V_2 - V_1} \right) [C_v (T_2 - T_1)], \text{ где } C_v = 20,786 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Затем зная, что  $V_1 = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} V_2$ , и, проведя не сложные алгебраические

преобразования, окончательно получим: 
$$a = \frac{RT_1}{P_1} \left( \frac{1}{1 - \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}} \right) C_v (T_2 - T_1).$$

### 2.3.4. Контроль знаний студента

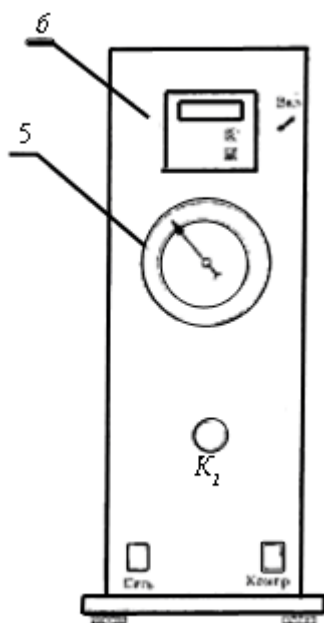
Входной теоретический контроль позволяет оценить усвоенные студентом знания и получить допуск к работе.

1. Укажите основные отличия реального газа от идеального?
2. Напишите уравнение Ван-дер-Ваальса для газа и поясните физический смысл констант, входящих в это уравнение?
3. В чем заключается суть эффекта Джоуля-Томсона?
4. Какой (какие) законы природы лежат в основе рабочей установки и в основе проведения эксперимента.
5. Какой процесс называется адиабатным? Почему на практике сложно реализовать адиабатный процесс?
6. Чем объясняется погрешность измерений?

### 2.3.5. Программа исследования

#### 2.3.5.1. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис.2.3.2.



*Рис. 2.3.2. Общий вид установки:*

*K1 – кран регулирования давления; 4 – ротаметр; 5 – манометр; 6 – измеритель температуры*

На передней панели находится двухканальный измеритель температуры 6 типа 2ТРМО, подключённый к двум хромель-копелевым термомпарам  $t_1$  и  $t_2$  (рис.2.3.3, 2.3.4), 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.2.3.3 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 термомпара ХК  $t_1$ , 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).

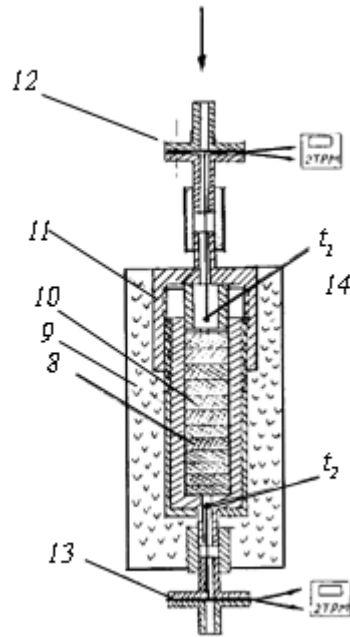


Рис. 2.3.3. Рабочий участок установки

На рис.2.3.4 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.

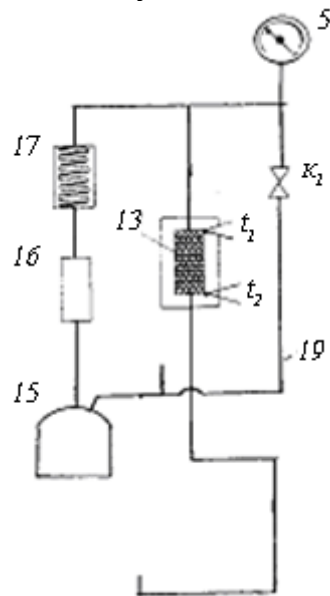


Рис. 2.3.4 Принципиальная схема установки:  
 5 – манометр; 13 – рабочий участок; 15 – компрессор; 16 – сепаратор;  
 17 - холодильник; 18 – дроссель

Принцип работы установки состоит в следующем. Сжатый воздух с помощью компрессора (9) подается в дроссель (12) через сепаратор (10) и холодильник (11). Давление воздуха на входе в дроссель регулируется краном (3). Манометр (6) измеряет избыточное давление  $\Delta P$  по отношению к атмосферному. Т.е. давление на входе в дроссель  $P_1 = P_{\text{атм}} + \Delta P$ , а на выходе  $P_2 = P_{\text{атм}}$ . Шкала манометра градуирована в единицах  $\text{КГС/СМ}^2$ .

### 2.3.5.2. Проведение опыта

После ознакомления с описанием экспериментальной установки необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

Проведение эксперимента осуществляется по следующей схеме:

1. Перед началом работы повернуть кран регулировки давления ( $K_1$ ) до упора против часовой стрелки.
2. Включить установку тумблером «Сеть». Включить измеритель температуры (5).
3. Измерить температуры воздуха  $T_1$  на входе и  $T_2$  выходе дросселя. Если они не меняются и совпадают ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ), можно начинать опыт.
4. Включить компрессор и установить начальное избыточное давление на входе  $\Delta P = 8 \text{ кгс/см}^2$ . По показаниям ротаметра определить объемный расход воздуха через дроссель (ниже см. дополнительную информацию по пользованию ротаметром).
5. Через 2-3 минуты по показаниям измерителя температуры (7) произвести отсчет температур  $T_1$  и  $T_2$ .
6. Повторить измерения, описанные в пунктах 4 - 5, для давлений на входе  $\Delta P = 9, 10, 11$  и  $12 \text{ кгс/см}^2$ . Данные занести в таблицу 2.3.1.
7. Убрать давление, выключить компрессор.
8. Полагаем, что объем воздуха после его перетекания через пористую перегородку за 1 секунду  $V_2 = G$ . Вычислим число молей в объеме  $V_2$ : 
$$v = \frac{\rho}{\mu} V_2, \text{ моль/с.}$$
9. Объем того же количества молей  $v$  воздуха до перетекания через перегородку приближенно можно оценить по формуле: 
$$V_1 = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} V_2, \text{ м}^3/\text{с.}$$
10. Константу Ван-дер-Ваальса  $a$  определить по формуле (2.3.9) для каждой серии опытов. Далее необходимо вычислить среднее значение. Для полученного значения  $a$  вычислите поправку к давлению.



нию воздуха. По формуле (2.3.4) оцените величину поправки  $b$  к объему воздуха.

11. Оценить погрешность измерений.

Таблица 2.3.1. Исходные опытные данные и результаты расчета

Номер опыта	$\bar{V}_2,$ м <sup>3</sup> /с	$G,$ кг/с	$v_2,$ м <sup>3</sup> /кг	$t_1,$ °С	$t_2,$ °С	$p_1,$ МПа	$p_2,$ МПа	$v_1,$ м <sup>3</sup> /кг	$a,$ Н·м <sup>4</sup> /кг <sup>2</sup>
1									
2									
3									

### 2.3.6. Требования к содержанию отчета по работе

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист.
2. Задание к лабораторной работе.
3. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
4. Результаты расчета оформить в виде табл.2.3.1.
5. Анализ результатов и выводы по работе.

### 2.4. Контрольные задания «Дросселирование»

Водяной пар с давлением  $p_1$  и степенью сухости  $x_1$  дросселируется до состояния сухого насыщенного пара ( $x_2=1$ ). Значения  $x_1$  даны в таблице 2.4.1. исходных данных.

Определить давление пара ( $p_2$ ) и уменьшение температуры при дросселировании ( $t_1 > t_2$ ), пользуясь таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара.

Представить процесс дросселирования водяного пара в  $h$ - $s$ -диаграмме.

Таблица 2.4.1. Исходные данные

Первая цифра шифра	$p_1,$ бар	Вторая цифра шифра	$x_1$
0	20	0	0,62
1	23	1	0,69
2	25	2	0,72
3	30	3	0,76