

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра общей и технической физики

Отчет по лабораторной работе №12

По дисциплине

ФИЗИКА

(наименование учебной дисциплины согласно учебному плану)

Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДЖОУЛЯ -ТОМСОНА ПРИ
АДИАБАТИЧЕСКОМ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА

Автор: студент гр. ИГ-22-1
(Шифр группы)

_____ (подпись)

_____ (ФИО)

Оценка: _____

Дата: _____

Проверил: _____

_____ (подпись)

_____ (ФИО)

Санкт-Петербург
2022 год

Цель работы:

- 1) определение изменения температуры углекислого газа при протекании через малопроницаемую перегородку при разных начальных значениях давления и температуры;
- 2) вычисление по результатам опытов коэффициентов Ван-дер-Ваальса "а" и "б".

Краткое теоретическое содержание:

Явление, изучаемое в работе: Эффект Джоуля-Томсона при адиабатическом истечении углекислого газа. Сущность явления: изменение температуры газа при адиабатическом расширении газа без совершения им полезной работы.

Основные определения физических величин, явлений, процессов.

Адиабатическое расширение – расширение газа без теплообмена с окружающей средой. ($Q=0$)

Идеальный газ – модель газа, в которой пренебрегаются размеры молекул по сравнению с расстоянием между ними, т.е. молекулы рассматриваются как материальные точки, также пренебрегаются силы взаимодействия между молекулами (за исключением моментов столкновения). Обычные газы при невысоких давлениях можно рассматривать, как идеальные.

Теплообмен – физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному либо непосредственно (при контакте), либо через разделяющую (тела или среды) перегородку из какого-либо материала.

Законы и соотношения, лежащие в основе лабораторной работы:

Первый закон термодинамики – теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы против внешних сил.

$$Q = \Delta U + A$$

Q – количество теплоты, Дж

U – внутренняя энергия, Дж

A – работы, Дж

Уравнение Менделеева-Клапейрона (идеального газа) – формула, устанавливающая зависимость между давлением, молярным объёмом и абсолютной температурой идеального газа, имеющая вид:

$$P \cdot V_m = \nu \cdot R \cdot T$$

P – давление, Па

V – объём, м³

R – универсальная газовая постоянная, $R=8,31$ Дж/(моль·К)

T – температура, К

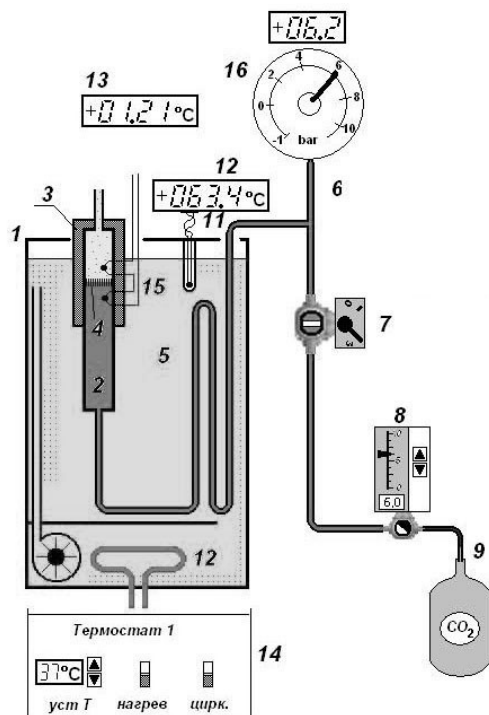
Теоретический ожидаемый результат:

Коэффициенты в уравнении Ван-дер-Ваальса (для углекислого газа):

$$a = 0,361 \text{ Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$$

$$b = 4,28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{моль}$$

Экспериментальная установка



1-теплоизоляционная защита, 2-каналы пористой перегородки, 3-трубка с пористой перегородкой, 4-пористая перегородка, 5-теплообменник, 6-магистраль, 7-кран, перекрывающий поток газа, 8-редуктор, регулирующий давление газа, 9-баллон с газом, 10-индикатор, отображающий температуру воды, 11-термопара, 12-термостат, 13-индикатор, отображающий дифференциальную температуру, 14-пульт, 15-дифференциальный термометр, 16-манометр, контролирующий давление газа.

Расчётные формулы:

1. Перепад давлений в теплоизолированной трубке:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \text{ где}$$

ΔP - разность давлений, $[\Delta P] = \text{Па}$;

P_1 - начальное давление, $[P_1] = \text{Па}$;

P_2 - атмосферное давление $[P_2] = \text{Па}$.

2. Коэффициент Джоуля-Томсона:

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{(2a/RT - b)}{C_p}, \text{ где}$$

μ - коэффициент Джоуля-Томсона, $[\mu] = ^\circ\text{C}/\text{Па}$;

ΔT - разность температур, $[\Delta T] = ^\circ\text{C}$;

a - постоянная Ван-дер-Ваальса, $[a] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}}$;

R - универсальная газовая постоянная, $R = 8,31441 \pm 0,00026 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$;

T - температура газа, $[T] = \text{К}$;

b - постоянная Ван-дер-Ваальса, $[b] = \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$;

C_p - теплоёмкость при постоянном давлении, $C_p = 41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

3. Температура инверсии:

$$T_i = \frac{2a}{R \cdot b}, \text{ где}$$

T_i - температура инверсии, $[T_i] = \text{К}$.

4. Температура критическая:

$$T_k = \frac{4}{27} \cdot T_i, \text{ где}$$

T_k - температура критическая.

Формулы косвенных погрешностей:

1. Абсолютная погрешность измерений коэффициента Джоуля-Томсона:

$$\Delta\mu = \mu \cdot \left(\frac{2\Delta T}{T_2 - T_1} + \frac{2\Delta P}{P_1 - P_2} \right), \text{ где}$$

ΔT - средняя арифметическая ошибка. $[\Delta T] = \text{K}$;

ΔP - приборная погрешность барометра, $[\Delta P] = \text{Па}$;

$T_2 - T_1$ - результат изменения температур, $[T_2 - T_1] = \text{K}$;

$P_1 - P_2$ - результат изменения давлений, $[P_1 - P_2] = \text{Па}$;

μ - коэффициент Джоуля -Томсона, $[\mu] = ^\circ\text{C} / \text{Па}$.

2. Абсолютная погрешность измерений температуры инверсии:

$$\Delta T_i = T_i \cdot \left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \right), \text{ где}$$

T_i - температура инверсии, $[T_i] = \text{K}$.

Δa - погрешность измерения коэффициента a , $[\Delta a] = \frac{\text{H} \cdot \text{M}^4}{\text{моль}}$;

Δb - погрешность измерения коэффициента b , $[\Delta b] = \frac{\text{M}^3}{\text{моль}}$;

a - постоянная Ван-дер-Ваальса, $[a] = \frac{\text{H} \cdot \text{M}^4}{\text{моль}}$;

b - постоянная Ван-дер-Ваальса, $[b] = \frac{\text{M}^3}{\text{моль}}$.

3. Абсолютная погрешность измерения температуры критической:

$$\Delta T_k = T_k \cdot \frac{\Delta T_i}{T_i}, \text{ где}$$

T_k - температура критическая;

ΔT_i - абсолютная погрешность измерений температуры инверсии;

T_i - температура инверсии, $[T_i] = \text{K}$.

4. Относительная погрешность измерения коэффициента Джоуля-Томсона:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\mu}{\mu} \cdot 100\%, \text{ где}$$

$\Delta\mu$ - абсолютная погрешность измерений коэффициента Джоуля-Томсона,

$[\Delta\mu] = ^\circ\text{C} / \text{Па}$;

μ - коэффициент Джоуля -Томсона, $[\mu] = ^\circ\text{C} / \text{Па}$.

Результаты измерений:

Физическая величина	T	ΔP	ΔT	μ	a	b	Tинв	Tкр
Ед.изм.	$^{\circ}C$	Па	$^{\circ}C$	$^{\circ}C/Па$	$\frac{Н \cdot м^4}{моль}$	$10^{-5} \frac{м^3}{моль}$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
Номер опыта								
1	20	1	11	11	0,818	352,6	328,8	321,7
2	20	0,9	9,87	10,97				
3	20	0,8	8,74	10,925				
4	20	0,7	7,63	10,9				
5	20	0,6	6,52	10,87				
6	40	1	9,8	9,8				
7	40	0,9	8,8	9,78				
8	40	0,8	7,81	9,7625				
9	40	0,7	6,82	9,74				
10	40	0,6	5,83	9,72				
11	70	1	8,51	8,51				
12	70	0,9	7,65	8,5				
13	70	0,8	6,79	8,4875				
14	70	0,7	5,94	8,49				
15	70	0,6	5,09	8,48				

Исходные данные:

P_2 – атмосферное давление $P_2 = 1 \text{ атм} \approx 10^5 \text{ Па}$;

R - универсальная газовая постоянная, $R = 8,31441 \pm 0,00026 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$;

C_p - теплоёмкость при постоянном давлении, $C_p = 41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Вычисления:

Используя формулу $\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{(2a/RT) - b}{C_p}$ ($C_p = 41 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$) и экспериментальные данные, полученные при трех значениях температуры, определяем постоянные a и b для углекислого газа по двум парам температур.

$T_1, \Delta T_1$ и $T_2, \Delta T_2$ - пары температур.

$$b = \frac{2a}{RT_1} - \frac{\Delta T_1 C_p}{\Delta P}$$

$$a = \frac{\Delta T_2 C_p R T_2 + b R T_2 \Delta P}{2 \Delta P}$$

$$b = \frac{C_p (\Delta T_2 T_2 - \Delta T_1 T_1)}{\Delta P (T_1 - T_2)}$$

$$a = \frac{C_p T_1 T_2 R (\Delta T_2 - \Delta T_1)}{2 \Delta P (T_1 - T_2)}$$

$$a = \frac{C_p T_1 T_2 R (\Delta T_2 - \Delta T_1)}{2 \Delta P (T_1 - T_2)} = \frac{41 * 40 * 20 * 8,31 * (11 - 9,8)}{2 * 1 * 10^5 * (40 - 20)} = 0,818 \text{ Дж}^2 / \text{моль}^2$$

$$b = \frac{C_p (\Delta T_2 T_2 - \Delta T_1 T_1)}{\Delta P (T_1 - T_2)} = \frac{41 (11 * 20 - 9,8 * 40)}{1 * 1 * 10^5 * (40 - 20)} = 352,6 * 10^{-5} \text{ М}^3 / \text{МОЛЬ}$$

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right) = \frac{1}{41} * \left(\frac{2 * 0,818}{8,31 * 20} - 352,6 * 10^{-5} \right) = - 8,6 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Па}$$

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right) = \frac{1}{41} * \left(\frac{2 * 0,818}{8,31 * 40} - 352,6 * 10^{-5} \right) = - 8,6 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Па}$$

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right) = \frac{1}{41} * \left(\frac{2 * 0,818}{8,31 * 70} - 352,6 * 10^{-5} \right) = - 8,6 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Па}$$

$$T_i = \frac{2a}{Rb} = \frac{2 * 0,818}{8,31 * 352,6 * 10^{-5}} = 55,8^\circ\text{C}$$

$$T_k = \frac{4}{27} T_i = \frac{4}{27} * 55,8 = 8,3^\circ\text{C}$$

Прямые погрешности:

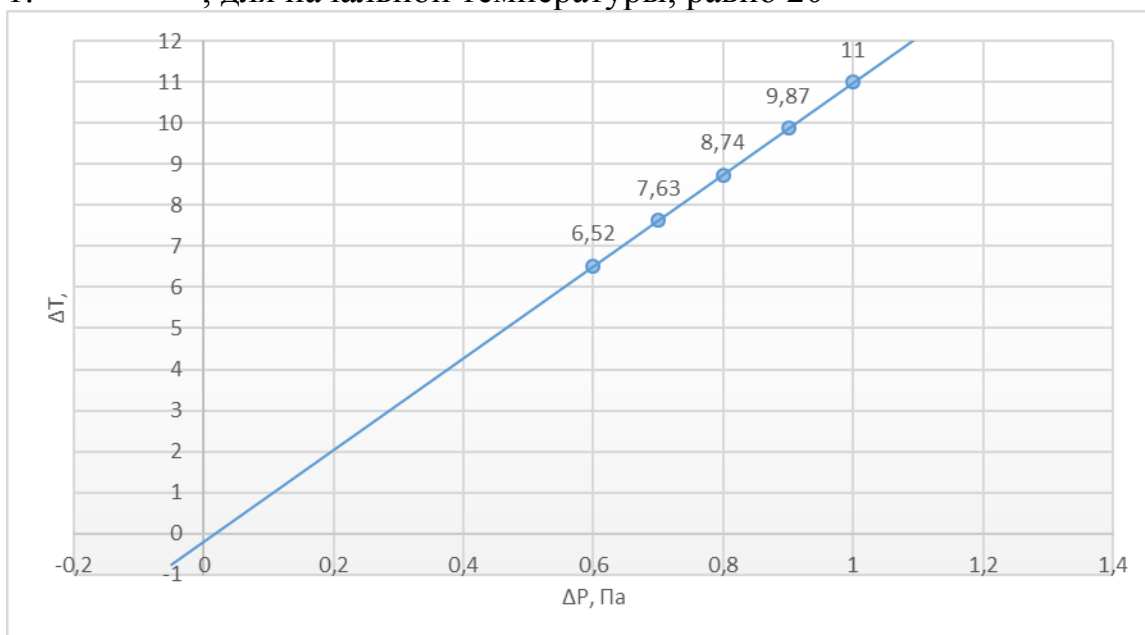
$$r_i = |\bar{T} - T_i|$$

Физическая величина	ΔT	\bar{T}	ΔT_i	$\Delta \bar{T}$	ΔP	\bar{P}	ΔP_i	$\Delta \bar{P}$
Ед.изм.	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	Па · 10 ⁵	Па · 10 ⁵	Па · 10 ⁵	Па · 10 ⁵
Номер опыта								
1	11	7,787	3,213	1,336	1	0,8	0,2	0,12
2	9,87		2,083		0,9		0,1	
3	8,74		0,953		0,8		0	
4	7,63		0,157		0,7		0,1	
5	6,52		1,267		0,6		0,2	
6	9,8		2,013		1		0,2	
7	8,8		1,013		0,9		0,1	
8	7,81		0,023		0,8		0	
9	6,82		0,967		0,7		0,1	
10	5,83		1,957		0,6		0,2	
11	8,51		0,723		1		0,2	
12	7,65		0,137		0,9		0,1	
13	6,79		0,997		0,8		0	
14	5,94		1,847		0,7		0,1	
15	5,09		2,697		0,6		0,2	

Примеры вычисления:

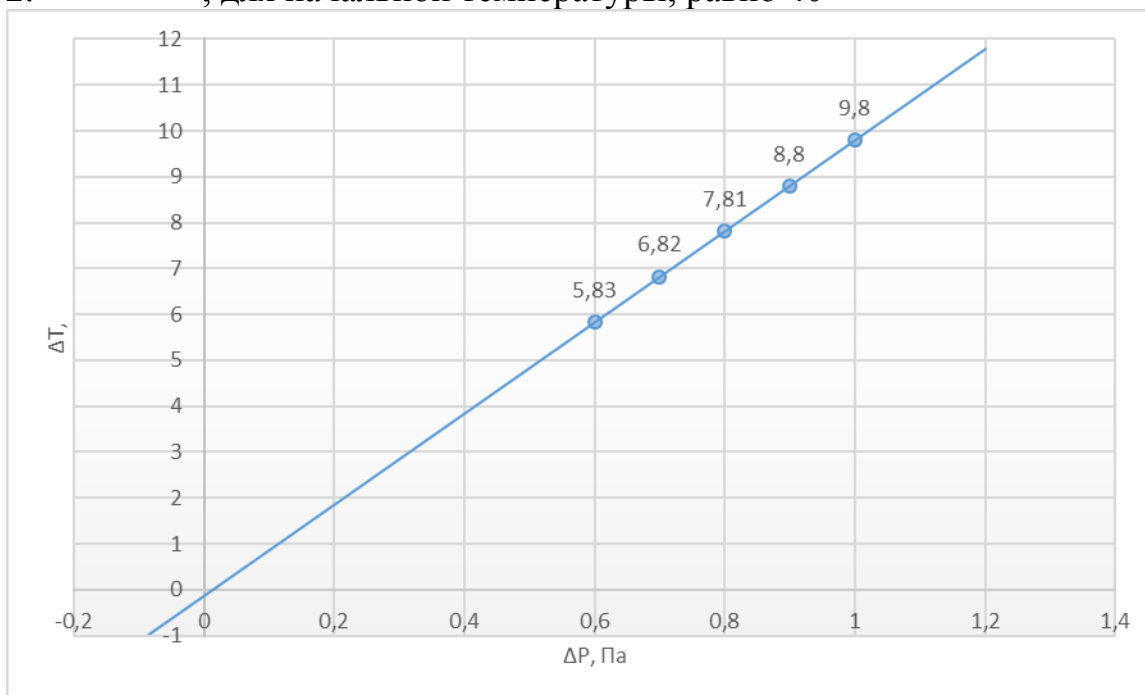
Графические вычисления:

1. $\Delta T = f(\Delta P)$, для начальной температуры, равно $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



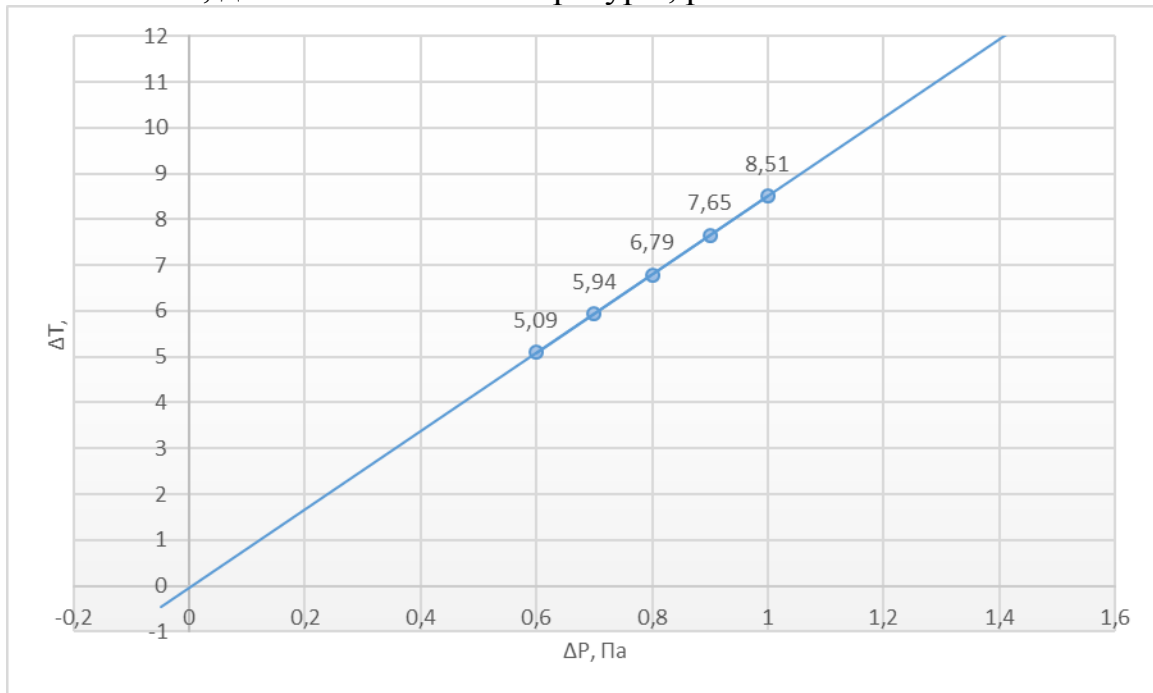
Из графика видно, что в момент, когда $\Delta P = 0$, значение $\Delta T/\Delta P = -0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Па}$, отсюда следует что $\Delta T/\Delta P = -0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Па}$.

2. $\Delta T = f(\Delta P)$, для начальной температуры, равно $40\text{ }^{\circ}\text{C}$



Из графика видно, что в момент, когда $\Delta P = 0$, значение $\Delta T/\Delta P = -0,12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Па}$ отсюда следует что $\Delta T/\Delta P = -0,12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Па}$

3. $\Delta T = f(\Delta P)$, для начальной температуры, равно $70\text{ }^{\circ}\text{C}$



Из графика видно, что в момент, когда $\Delta P = 0$, значение $\Delta T/\Delta P = -0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Па}$
отсюда следует что $\Delta T/\Delta P = -0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Па}$

Вычисление погрешностей косвенных вычислений:

$$\Delta\mu = \mu \left(\frac{2\overline{\Delta T}}{T} + \frac{2\overline{\Delta P}}{P} \right) = -8,6 * 10^{-5} * \left(\frac{2 * 1,336}{7,787} + \frac{2 * 0,12}{0,8} \right) = -5,53 * 10^{-5};$$

$$\Delta a = a \left(\frac{\overline{\Delta T_1}}{T_1} + \frac{\overline{\Delta T_2}}{T_2} + \frac{\overline{\Delta\Delta T}}{(\Delta T_2 - \Delta T_1)} + \frac{\overline{\Delta\Delta P}}{\Delta P} + \frac{\overline{\Delta T}}{T_1 - T_2} \right) =$$

$$= 0,818 * \left(\frac{11}{20} + \frac{9,8}{40} + \frac{1,336}{1,2} + \frac{0,12}{0,8} + \frac{7,787}{20} \right) =$$

$$= 2 \frac{H * M^4}{\text{моль}^2};$$

$$\Delta b = b \left(\frac{\overline{\Delta\Delta T}}{(\Delta T_2 T_2 - \Delta T_1 T_1)} + \frac{\overline{\Delta\Delta P}}{\Delta P} + \frac{\overline{\Delta T}}{T_1 - T_2} \right) =$$

$$= 352,6 * 10^{-5} * \left(\frac{1,336}{11 * 20 - 9,8 * 40} + \frac{0,12}{0,8} + \frac{7,787}{20} \right) =$$

$$= 187,4 * 10^{-5} \frac{M^3}{\text{моль}}.$$

Окончательный результат:

$$\mu = \mu \pm \Delta\mu$$

$$\mu = (-8,6 \pm 5,53) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Па};$$

$$a = a \pm \Delta a;$$

$$a = (0,818 \pm 2) \frac{H \cdot M^4}{\text{моль}^2};$$

$$b = b \pm \Delta b;$$

$$b = (352,6 \pm 187,4) \cdot 10^{-5} \frac{M^3}{\text{моль}}.$$

Вывод:

Проделав лабораторную работу на исследования эффекта Джоуля-Томсона при адиабатическом истечении углекислого газа, были экспериментально определены коэффициенты Ван-дер-Ваальса. При сравнении полученных результатов с табличными, было выяснено, что полученные результаты отличаются от табличных; 1) для коэффициента а на $\frac{a - a_{теор}}{a} * 100\% = 56\%$; 2) для коэффициента b на $\frac{b - b_{теор}}{b} * 100\% = 99\%$, с учётом косвенных погрешностей. Такие отклонения прежде всего объясняется погрешностями измерительным приборов, а также, в некоторой мере, и человеческим фактором.