

Отчёт о выполнении лабораторной работы 2.2.1

Мещеряков Павел Б02-920

10 сентября 2020 г.

Определение теплоты испарения жидкости

Цель работы:

1) регистрация зависимости концентрации гелия в воздухе от времени с помощью датчиков теплопроводности при разных начальных давлениях смеси газов; 2) определение коэффициента диффузии по результатам измерений.

В работе используются:

измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

Теоретическое введение

Рассмотрим процесс выравнивания концентрации. Пусть концентрации одного из компонентов смеси в сосудах V_1 и V_2 равны n_1 и n_2 . Плотность диффузионного потока любого компонента (т. е. количество вещества, проходящее в единицу времени через единичную поверхность) определяется законом Фика:

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x},$$

где D — коэффициент взаимной диффузии газов, а j — плотность потока частиц.

В нашем случае ввиду того что, а) объем соединительной трубки мал по сравнению с объемами сосудов, б) концентрацию газов внутри каждого сосуда можно считать постоянной по всему объему. Диффузионный поток в любом сечении трубки одинаков. Поэтому,

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}.$$

Обозначим через Δn_1 и Δn_2 изменения концентрации в объемах V_1 и V_2 за время Δt . Тогда $V_1 \Delta n_1$ равно изменению количества компонента в объеме V_1 , а $V_2 \Delta n_2$ — изменению количества этого компонента в V_2 . Из закона сохранения вещества следует, что $V_1 n_1 + V_2 n_2 = \text{const}$, откуда $V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2$. Эти изменения происходят вследствие диффузии, поэтому:

$$V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2.$$

С другой стороны $V_1 \Delta n_1 = J \Delta t$ и $V_1 \frac{dn_1}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}$. Аналогично $V_2 \frac{dn_2}{dt} = DS \frac{n_1 - n_2}{l}$. Тогда

$$\frac{d(n_1 - n_2)}{dt} = -\frac{n_1 - n_2}{l} \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2}.$$

Проинтегрируем и получим, что

$$n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{-t/\tau},$$

где $(n_1 - n_2)_0$ — разность концентраций в начальный момент времени,

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD}.$$

Для измерения концентраций в данной установке применяются датчики теплопроводности D_1, D_2 (см. рис. 1) используется зависимость теплопроводности газовой смеси от ее состава. Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема (рис. 1). Здесь D_1 и D_2 — датчики теплопроводности, расположенные в сосудах V_1 и V_2 . Сопротивления R_1, R_2 и R служат для установки прибора на нуль (балансировка моста). В одну из диагоналей моста включен гальванометр, к другой подключается небольшое постоянное напряжение. Мост балансируется при заполнении сосудов (и датчиков) одной и той же смесью.

При заполнении сосудов смесями различного состава возникает «разбаланс» моста. При незначительном различии в составах смесей показания гальванометра, подсоединённого к диагонали моста, будут пропорциональны разности концентраций примеси. В процессе диффузии разность концентраций убывает по экспоненте, и значит по тому же закону изменяются во времени показания гальванометра

$$U = U_0 \exp(-t/\tau).$$

Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 1. Там же показана схема электрических соединений и конструкция многоходового крана K_6

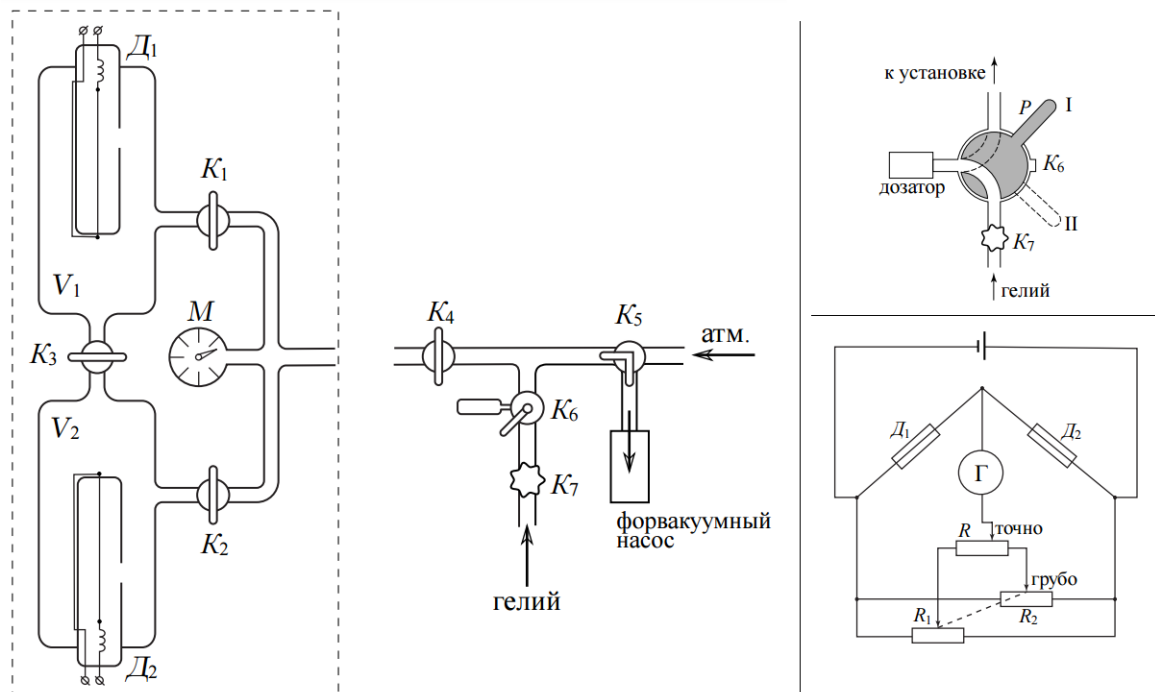


Рис. 1: схема установки

Установка состоит из двух сосудов V_1 и V_2 соединенных краном K_3 , форвакуумного насоса Ф.Н. с выключателем Γ , манометра M и системы напуска гелия, включающей в себя краны K_6 и K_7 . Кран K_5 позволяет соединять форвакуумный насос либо с установкой,

либо с атмосферой. Между форвакуумным насосом и краном K_5 вставлен предохранительный баллон П.Б., защищающий кран K_5 и установку при неправильной эксплуатации ее от попадания форвакуумного масла из насоса Ф.Н. Сосуды V_1 и V_2 и порознь и вместе можно соединять как с системой напуска гелия, так и с форвакуумным насосом. Для этого служат краны K_1 , K_2 , K_4 и K_5 . Манометр M регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или другой сосуды.

Для сохранения гелия, а также для уменьшения неконтролируемого попадания гелия в установку (по протечкам в кране K_6) между трубопроводом подачи гелия и краном K_6 поставлен металлический кран K_7 . Его открывают только на время непосредственного заполнения установки гелием. Все остальное время он закрыт.

В силу того, что в сосуд требуется подавать малое давление гелия, между кранами K_7 и K_4 стоит кран K_6 , снабженный дозатором. Дозатор - это маленький объем, который заполняют до давления гелия в трубопроводе, а затем уже эту порцию гелия с помощью крана K_6 впускают в установку.

Описание схемы электрического соединения. D_1 и D_2 — сопротивления проволок датчиков парциального давления, которые составляют одно плечо моста. Второе плечо моста составляют сопротивления r_1 , R_1 и r_2 , R_2 . $r_1 \ll R_1$, $r_2 \ll R_2$, R_1 и R_2 спаренные, их подвижные контакты находятся на общей оси. Оба они используются для грубой регулировки моста. Точная балансировка моста выполняется потенциометром R . Последовательно с гальванометром G , стоящим в диагонали моста, поставлен магазин сопротивлений MR . Когда мост балансируют, магазин сопротивлений выводят на ноль. В процессе же составления рабочей смеси в сосудах V_1 и V_2 мост разбалансирован. Чтобы не сжечь при этом гальванометр, магазин MR ставят на максимальное сопротивление.

1 Ход работы

1. Включим питание электрической схемы установки рубильником B . Откроем краны K_1 , K_2 , K_3 . Перепишем параметры установки:

$$V_1 = V_2 = V = 800 \pm 5 \text{ см}^3, \quad \frac{L}{S} = 15.0 \pm 0.1 \text{ см}^{-1}$$

Поскольку манометр измеряет разность давления внутри резервуаров с атмосферным в $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ необходимо записать показание манометра при полностью откачанном сосуде $P_0 = 98.0 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ (оно равно атмосферному) и в дальнейшем постоянно вычитать из него показания прибора, тем самым будет найдено давление внутри установки.

2. Очистим установку от всех газов, которые в ней есть. Для этого откроем кран K_4 . Включим форвакуумный насос (Ф.Н.) выключателем T , находящемся на насосе, и соединим насос с установкой, повернув ручку крана K_5 длинным концом рукоятки влево (на установку). Откачаем установку до давления ≈ 0.1 торр, что достигается непрерывной работой насоса в течение 3–5 минут. Для прекращения откачки ручку крана K_5 поставим длинным концом вверх.
3. Напустим в установку воздух до рабочего давления (вначале $P \approx 60$ торр), чтобы сбалансировать мост на рабочем давлении. Для этого рукоятку крана K_5 повернём из положения вправо (воздух поступает в насос) в положение влево (воздух из насоса поступает в установку). Эту операцию повторим несколько раз, пока не будет достигнуто нужное давление. Сбалансируем мост.
4. Заполним установку рабочей смесью согласно порядку предложенному в указании к работе: в сосуде V_2 должен быть воздух, а в сосуде V_1 — смесь воздуха, с гелием.

5. Проведём измерения. Для этого откроем кран K_3 , включим компьютер и затем скачаем из него данные показаний гальванометра с течением времени. Процесс измерений продолжим до тех пор, пока разность концентраций (показания гальванометра) не упадет на 40–50%. Будем продолжать аналогичные измерения при различных значениях $P_{\text{рабочее}}$ в интервале 40–180 торр. Данные представлены в таблице 1. Давления там приведены уже в торр.
6. Для каждого из давлений построим графики, откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат - логарифм от показаний гальванометра. Видим, что теоретическая зависимость $U = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$ подтверждается экспериментально.

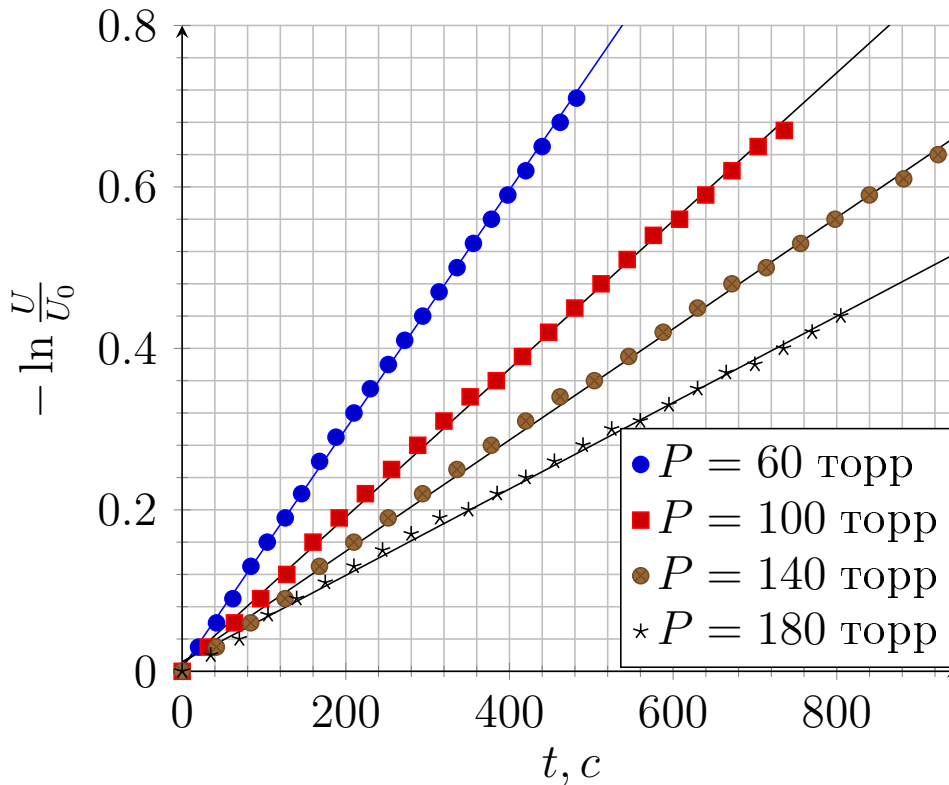


Рис. 2: График зависимости $-\ln \frac{U}{U_0}(t)$

По угловым коэффициентам экспериментальных прямых и известным параметрам установки рассчитаем коэффициенты взаимной диффузии и их погрешности при выбранных давлениях по формулам:

$$D = \frac{1}{2}kV\frac{L}{S}, \quad \sigma_D = D\sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{3\sigma_V}{2V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L/S}}{L/S}\right)^2},$$

где k - коэффициенты наклонов прямых. Данные представлены в таблице 3.

7. Построим график зависимости коэффициента диффузии от давления в координатах D , $\frac{1}{P}$. Погрешность рассчитывается по формуле $\sigma_{\frac{1}{P}} = \frac{\sigma_P}{P^2}$, где $\sigma_P = 7.4$ торр. Рассчитаем величину коэффициента диффузии при атмосферном давлении. Для этого

Таблица 1: Данные полученные с помощью компьютера

P, topp															
60.00				100.00				140.00				180.00			
t, c	U, MB	ln $\frac{U}{U_0}$	$\sigma_{\ln \frac{U}{U_0}}$	t, c	U, MB	ln $\frac{U}{U_0}$	$\sigma_{\ln \frac{U}{U_0}}$	t, c	U, MB	ln $\frac{U}{U_0}$	$\sigma_{\ln \frac{U}{U_0}}$	t, c	U, MB	ln $\frac{U}{U_0}$	$\sigma_{\ln \frac{U}{U_0}}$
0.00	9.24	0.00	0.008	0.00	18.25	0.00	0.004	0.00	16.46	0.00	0.004	0.00	17.22	0.00	0.004
19.98	8.98	-0.03	0.008	31.90	17.72	-0.03	0.004	41.81	15.98	-0.03	0.004	34.91	16.83	-0.02	0.004
41.98	8.68	-0.06	0.008	63.90	17.16	-0.06	0.004	83.81	15.46	-0.06	0.004	69.91	16.46	-0.04	0.004
61.98	8.41	-0.09	0.008	95.90	16.62	-0.09	0.004	125.81	14.97	-0.09	0.005	104.91	16.11	-0.07	0.004
83.98	8.13	-0.13	0.008	127.90	16.10	-0.12	0.004	167.81	14.51	-0.13	0.005	139.91	15.78	-0.09	0.004
103.98	7.89	-0.16	0.008	159.90	15.61	-0.16	0.004	209.81	14.07	-0.16	0.005	174.91	15.46	-0.11	0.004
125.98	7.63	-0.19	0.009	191.90	15.14	-0.19	0.004	251.81	13.65	-0.19	0.005	209.91	15.16	-0.13	0.004
145.98	7.40	-0.22	0.009	223.90	14.69	-0.22	0.004	293.81	13.24	-0.22	0.005	244.91	14.86	-0.15	0.004
167.98	7.15	-0.26	0.009	255.90	14.25	-0.25	0.004	335.81	12.85	-0.25	0.005	279.91	14.58	-0.17	0.004
187.98	6.94	-0.29	0.009	287.90	13.84	-0.28	0.005	377.81	12.48	-0.28	0.005	314.91	14.30	-0.19	0.005
209.98	6.72	-0.32	0.009	319.90	13.43	-0.31	0.005	419.81	12.12	-0.31	0.005	349.91	14.03	-0.20	0.005
229.98	6.52	-0.35	0.009	351.90	13.04	-0.34	0.005	461.81	11.77	-0.34	0.005	384.91	13.78	-0.22	0.005
251.98	6.31	-0.38	0.010	383.90	12.67	-0.36	0.005	503.81	11.44	-0.36	0.005	419.91	13.52	-0.24	0.005
271.98	6.13	-0.41	0.010	415.90	12.30	-0.39	0.005	545.81	11.11	-0.39	0.005	454.91	13.28	-0.26	0.005
293.98	5.93	-0.44	0.010	447.90	11.96	-0.42	0.005	587.81	10.81	-0.42	0.006	489.91	13.04	-0.28	0.005
313.98	5.76	-0.47	0.010	479.90	11.62	-0.45	0.005	629.81	10.51	-0.45	0.006	524.91	12.81	-0.30	0.005
335.98	5.58	-0.50	0.010	511.90	11.29	-0.48	0.005	671.81	10.22	-0.48	0.006	559.91	12.58	-0.31	0.005
355.98	5.43	-0.53	0.011	543.90	10.98	-0.51	0.005	713.81	9.94	-0.50	0.006	594.91	12.36	-0.33	0.005
377.98	5.26	-0.56	0.011	575.90	10.67	-0.54	0.005	755.81	9.67	-0.53	0.006	629.91	12.15	-0.35	0.005
397.98	5.11	-0.59	0.011	607.90	10.38	-0.56	0.006	797.81	9.41	-0.56	0.006	664.91	11.94	-0.37	0.005
419.98	4.95	-0.62	0.011	639.90	10.10	-0.59	0.006	839.81	9.17	-0.59	0.006	699.91	11.74	-0.38	0.005
439.98	4.81	-0.65	0.012	671.90	9.82	-0.62	0.006	881.81	8.92	-0.61	0.006	734.91	11.53	-0.40	0.005
461.98	4.66	-0.68	0.012	703.90	9.55	-0.65	0.006	923.81	8.68	-0.64	0.007	769.91	11.34	-0.42	0.005
481.98	4.53	-0.71	0.012	735.90	9.30	-0.67	0.006	957.81	8.49	-0.66	0.007	804.91	11.14	-0.44	0.005

Таблица 2: Уравнения фитирующих прямых

P, торр	60	$\ln \frac{U}{U_0} = -(42 \pm 16) \cdot 10^{-4} - (1480 \pm 5) \cdot 10^{-6} t$
	100	$\ln \frac{U}{U_0} = -(76 \pm 20) \cdot 10^{-4} - (917 \pm 5) \cdot 10^{-6} t$
	140	$\ln \frac{U}{U_0} = -(109 \pm 26) \cdot 10^{-4} - (689 \pm 4) \cdot 10^{-6} t$
	180	$\ln \frac{U}{U_0} = -(119 \pm 22) \cdot 10^{-4} - (535 \pm 4) \cdot 10^{-6} t$

Таблица 3:

$P, \text{торр}$	$D, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	$\sigma_D, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
60	8.88	0.18
100	5.50	0.11
140	4.13	0.09
180	3.21	0.07

Таблица 4:

$\frac{1}{P}, \text{торр}^{-1} \cdot 10^{-3}$	$\sigma_{\frac{1}{P}}, \text{торр}^{-1} \cdot 10^{-3}$	$D, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
16.67	2	8.88
10.00	0.8	5.50
7.14	0.4	4.13
5.56	0.2	3.21

экстраполируем зависимость $D(\frac{1}{P})$ и посмотрим через какую точку проходит наша прямая. Итак,

$$D_{\text{атм}} = 0.68 \pm 0.06 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Погрешность $D_{\text{атм}}$ была оценена с помощью экстраполяции крайних уравнений прямых. Табличное значение для этого коэффициента

$$D_{\text{табл}} = 0.57 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

8. Оценим по полученным результатам длину свободного пробега и размер молекулы. Для этого воспользуемся следующими формулами.

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \text{ где } \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}, \quad \Pi \approx \frac{kT}{\sqrt{2} \lambda P},$$

где Π - площадь эффективного сечения частиц, $r \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Pi}{\pi}}$.

Итак,

$$\lambda \approx 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \quad \Pi \approx 1.8 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2, \quad r \approx 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Табличное значение для размера молекулы $r = 1.0 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

2 Вывод

В данной работе было проверено, что закон $U = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$ выполняется с высокой точностью.

Так же в работе было найдено значение коэффициента диффузии гелия в воздухе, а так же оценены длина свободного пробега и размер молекулы гелия. К сожалению, результат не сошёлся с табличным. Этому есть несколько разумных объяснений. Вероятно, были совершены ошибки на этапе заготовки смесей газов в сосудах

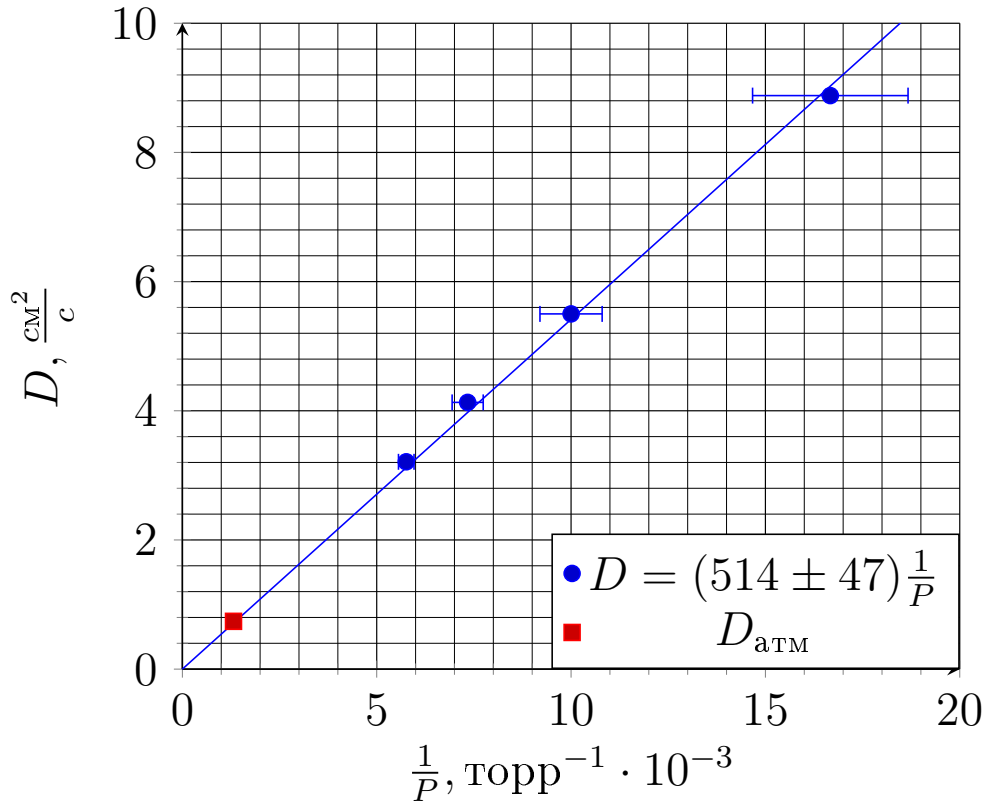


Рис. 3: График зависимости $D(\frac{1}{P})$

(погрешности определения давлений) и ошибки экспериментатора. А так же есть подозрение, что газ, который в работе назывался гелием, на самом деле был разбавленным. Так же не стоит забывать о том, что численный множитель $\frac{1}{3}$ в формуле для длины свободного пробега, является на самом деле данью традиции, поэтому на ювелирную точность определения параметров в последнем пункте претендовать не стоит. В любом случае методика данной работы позволяет с достаточной точностью получить приблизительное значение коэффициента диффузии и позволяет оценить такие важные физические величины, как длина свободного пробега и размер молекулы газа.