

Отчет о выполнении работы №1.3.3
Измерение вязкости воздуха при течении в
тонких трубках

Воейко Андрей Александрович, Б01-109

Долгопрудный, 2022

1 Аннотация.

В работе определяется отношение C_p/C_v для углекислого газа по измерению давления в стеклянном сосуде. Измерения проводятся сначала после адиабатического расширения, а затем после нагревания газа до комнатной температуры.

2 Теоретические сведения и экспериментальная установка.

2.1 Экспериментальная установка.

Используемая для опытов установка состоит из стеклянного сосуда А (см. рисунок 1), снабженного краном К и U-образным жидкостным манометром М, измеряющим избыточное давление газа в сосуде. Само избыточное дав-

ление создается путем закачивания в сосуд углекислого газа из газгольдера Г, соединенного с сосудом через кран K_1 . В начале опыта в сосуде имеется газ при комнатной температуре T_1 и давлении P_1 , несколько превышающем атмосферное давление P_0 .

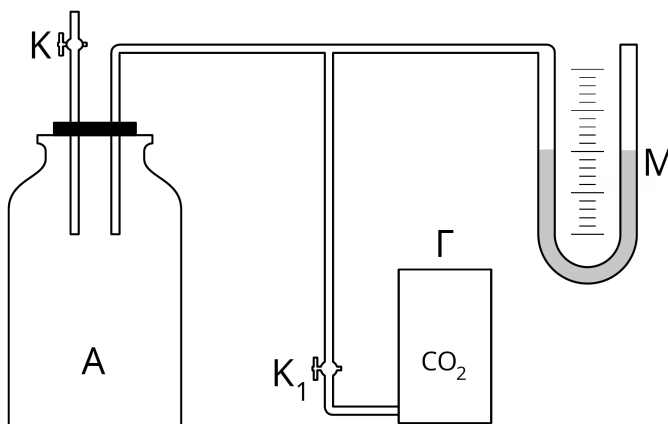


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

После открытия крана К, соединяющего сосуд А с атмосферой, давление и температура газа будут понижаться. Это уменьшение можно считать квазиадиабатическим, так как процесс изменения давления происходит значительно быстрее изменения температуры.

Преобразуем уравнение адиабаты с помощью уравнения Клапейрона к переменным P , T . Обозначим состояние газа после повышения давления в сосуде и выравнивания температуры индексом «1», а сразу после открытия крана и выравнивания давления с атмосферным давлением – индексом «2».

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma}. \quad (1)$$

Давление P_2 после адиабатического расширения газа равно атмосферному давлению P_0 , а температура T_2 будет ниже комнатной температуры T_1 (температура газа понижается, так как работа расширения совершается за счет внутренней энергии газа).

После того, как кран К отсоединит сосуд от атмосферы, происходит медленное изохорическое нагревание газа со скоростью, определяемой теплопроводностью стеклянных стенок сосуда. Вместе с ростом температуры растет и давление газа. За время порядка Δt_T система достигает равновесия, и установившаяся температура газа T_3 становится равной комнатной T_1 .

Изохорический процесс выравнивания температуры при закрытом кране подчиняется закону Гей-Люссака:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} = \frac{P_1}{T_1}. \quad (2)$$

Исключая таким образом отношение температур, получаем:

$$\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^\gamma = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma-1}. \quad (3)$$

Отсюда:

$$\gamma = \frac{\ln(P_1/P_0)}{\ln(P_1/P_3)}. \quad (4)$$

Учитывая, что $P_1 = P_0 + \rho gh_1$, $P_3 = P_0 + \rho gh_2$, получаем

$$\gamma = \frac{\ln(1 + \rho gh_1/P_0)}{\ln(1 + \rho gh_1/P_0) - \ln(1 + \rho gh_2/P_0)} \approx \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (5)$$

2.1.1 Время протекания газа.

Оценим время выравнивания давления Δt_p , пренебрегая вязкостью газа. В данном случае это можно сделать из-за малой длины трубки, через которую вытекает газ.

После открытия крана К по газу со скоростью звука c будет распространяться волна разрежения L/c (где L – высота сосуда) она достигает дна. Весь газ придет в движение, и через несколько таких интервалов процесс вытекания будет почти установившимся, квазистационарным. При этом скорость истечения v можно рассчитать по уравнению Бернулли для несжимаемой среды, поскольку давление воздуха мало отличается от атмосферного и изменением плотности допустимо пренебречь:

$$v = \sqrt{2(P - P_0)/\rho_0}.$$

За время dt из сосуда через отверстие площадью S_r , вытечет масса газа $\rho_0 S_r v dt$, где плотность взята при атмосферном давлении из-за малого

изменения давления газа.

В сосуде объема V_0 давление за это же время снизится на dP , и масса газа при адиабатическом истечении уменьшится на величину

$$dm = V_0 d\rho = \frac{V_0}{c^2} dP.$$

Здесь использовано определение адиабатической скорости звука

$$c^2 = \left(\frac{\delta P}{\delta \rho} \right)_S.$$

Составив баланс вытекающей массы и остающейся в сосуде, получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP}{\sqrt{P - P_0}} = - \frac{S_r c^2 \sqrt{2\rho_0}}{V_0} dt.$$

Интегрируя, найдем искомое время вытекания газа:

$$t_P = \frac{V_0}{S_r c} \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\gamma P_0}}. \quad (6)$$

Используя приблизительные данные установки, находим $t_P = 0,1$ с.

3 Результаты измерений и и обработка данных.

3.1 Оценка времени теплообмена Δt_T .

Проведем опыт по оценке Δt_T . Для этого наберем углекислого газа в сосуд и подождем, пока давление газа в сосуде перестанет меняться, следя за результатами. В таблице в качестве погрешности для времени указано

№	Прошло, с	h_1 , см	h_2 , см	Δh , см
1	60 ± 10	$22,1 \pm 0,1$	$11,4 \pm 0,1$	$10,7 \pm 0,2$
2	120 ± 10	$22,0 \pm 0,1$	$11,5 \pm 0,1$	$10,5 \pm 0,2$
3	240 ± 10	$21,9 \pm 0,1$	$11,6 \pm 0,1$	$10,4 \pm 0,2$
4	330 ± 10	$21,8 \pm 0,1$	$11,7 \pm 0,1$	$10,1 \pm 0,2$
5	480 ± 10	$21,7 \pm 0,1$	$11,7 \pm 0,1$	$10,0 \pm 0,2$
6	600 ± 10	$21,7 \pm 0,1$	$11,7 \pm 0,1$	$10,0 \pm 0,2$

Таблица 1: Результаты измерения зависимости избыточного давления от времени.

10 с, так как для нахождения высоты столбиков и разницы результатов требуется время. Тем не менее, считать это проблемой не стоит, так как вычисления носят оценочный характер.

На основании этих данных построим график зависимости избыточного давления от времени.

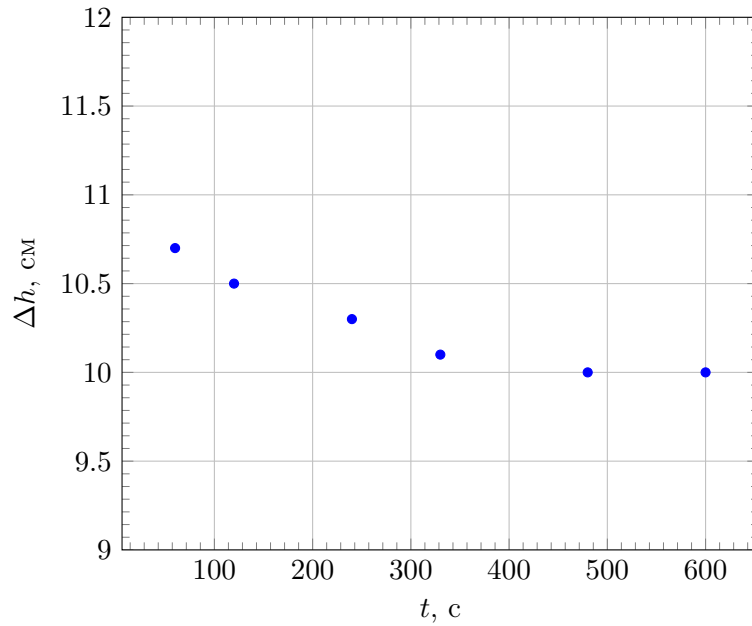


Рис. 2: Зависимость избыточного давления от времени.

Таким образом из графика видно, что 10 минут хватает для теплообмена.

3.2 Результаты измерений.

№	До открытия крана			После открытия крана			γ	Δt , с
	h_1 , см	h_2 , см	Δh , см	h_1 , см	h_2 , см	Δh , см		
1	21,7	11,7	10,0	18,0	15,4	2,6	1,35	0,5
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,10$	$\pm 0,3$
2	21,8	11,6	10,2	17,9	15,5	2,4	1,31	0,5
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,09$	$\pm 0,3$
4	21,5	11,9	9,6	17,8	15,6	2,2	1,30	0,7
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,10$	$\pm 0,3$
3	21,3	12,3	9,0	17,7	15,7	2,0	1,29	1,0
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,10$	$\pm 0,3$
5	21,4	12,0	9,4	17,6	15,8	1,8	1,24	4,0
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,09$	$\pm 0,3$
6	21,3	12,1	9,2	17,6	15,8	1,8	1,24	4,0
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,09$	$\pm 0,3$
7	21,2	12,2	9,0	17,5	15,9	1,6	1,22	5,0
	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,09$	$\pm 0,3$

Таблица 2: Результаты измерения избыточного давления до и после открытия крана.

На основании этих данных построим график. Аппроксимируем данные к прямой, $\gamma = a + b\Delta t$.

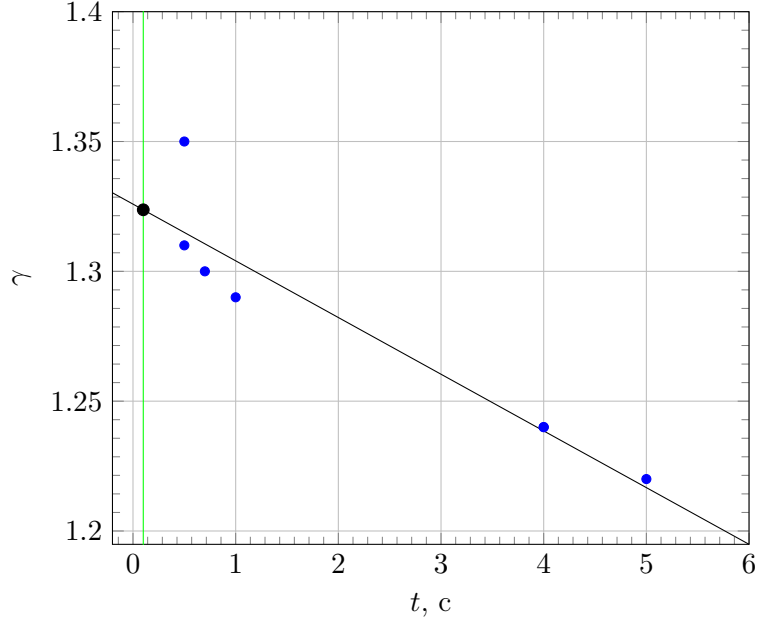


Рис. 2: Зависимость избыточного давления от времени.

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = -0,0218$$

$$\sigma_b = \frac{1}{\sqrt{7}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2} = -0,0035$$

$$a = \langle y \rangle - b \langle x \rangle = 1,33$$

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = 1,33$$

Теперь, зная эти коэффициенты, найдем γ при $\Delta t = 0,1$ с. $\gamma_{0,1} = a + 0,1b = 1,32 \pm 0,21$.

4 Выводы.

В работе были произведены измерения избыточных давлений для различных значений времени открытия крана. По этим данным путем экстраполяции было вычислено значение $\gamma_{0,1} = 1,32$, которое мы считаем достаточным для того, чтобы установление давления практически остановилось, но недостаточным для того, чтобы теплообмен серьезно повлиял на температуру газа в сосуде. Погрешность составила $\pm 0,21$, или 16%. Табличное значение γ для углекислого газа, как и для любого другого газа с линейной молекулой, составляет 1,4, то есть найденное нами

γ находится в пределах погрешности. С другой стороны, сама погрешность, как уже сказано выше, составляет 16%.

На погрешность оказывают влияние как сложность измерения высоты столбиков жидкости, так и сложность измерения времени открытия крана, ведь там в качестве погрешности выступает скорость реакции человека, то есть погрешность чуть ли не одного порядка с величиной.

Уменьшить погрешность измерения времени довольно просто: необходимо вместо крана установить электронный клапан, управляемый простым микроконтроллером, чтобы можно было заранее установить время его открытия. Это позволит существенно снизить погрешность, так как в роли нее будет выступать время, необходимое для открытия/закрытия клапана.

С давлением все несколько сложнее. Для начала, предположим, что мы не хотим использовать манометры другой конструкции. Тогда, во-первых, необходимо уменьшить влияния поверхностного натяжения, чтобы верхний край столбика воды был горизонтальным. Для этого можно использовать трубки большего диаметра и/или другую, менее вязкую жидкость, для того, чтобы она меньше цеплялась за стенки трубки. Для того, чтобы получить значительный эффект от этого улучшения, необходимо использовать не сантиметровую, а миллиметровую шкалу.

Другим возможным решением является использование жидкости с меньшей плотностью, чтобы сами столбцы были выше. Но большинство распространенных жидкостей, плотность которых меньше, чем у воды, либо более вязкие (различные масла, глицерин, и пр.), либо гораздо интенсивнее испаряются (бензин и другие углеводороды, спирт, ацетон), что приведет к изменению состава газа, а значит повлияет на результаты эксперимента.