

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 2.3.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА***

* Аникин А.И. Свойства газов. Свойства конденсированных систем: лабораторный практикум / А.И. Аникин; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2014. – 48 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

4.1. Теоретические положения

Между параллельными слоями газа, движущимися с различными скоростями, возникают силы внутреннего трения. Действие этих сил проявляется в том, что на слой газа со стороны соседнего с ним слоя, движущегося быстрее, действует ускоряющая сила. И, наоборот, со стороны соседнего слоя, движущегося медленнее, действует тормозящая сила. Силы внутреннего трения направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

На рис. 4.1 изображен тонкий слой газа, движущийся со скоростью v_0 параллельно плоскости xy . Газовый поток течет вдоль оси y , а скорость течения изменяется только в направлении оси z . На рассматриваемый слой со стороны соприкасающегося с ним сверху слоя газа действует сила трения F' , а со стороны соприкасающегося снизу слоя газа – сила трения F'' . Эти силы направлены в противоположные стороны и равны по модулю

$$F' = F'' = F .$$

Модуль силы трения можно найти по закону Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S ,$$

где η – динамический коэффициент вязкости; $\frac{dv}{dz}$ – градиент скорости в направлении оси z , перпендикулярной к поверхности слоя; S – площадь поверхности слоя.

Все сказанное выше справедливо и для жидкостей. Чем больше коэффициент вязкости, тем больше сила внутреннего трения. Коэффици-

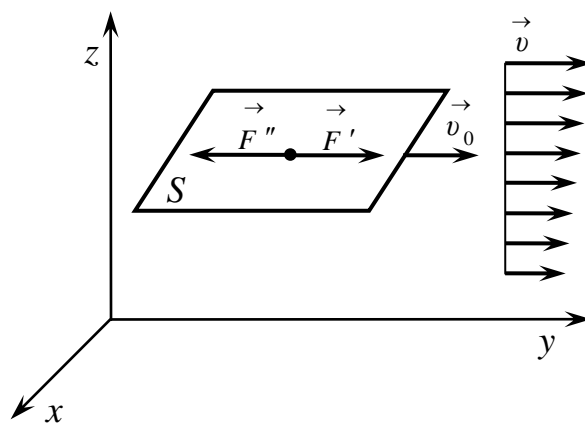


Рис. 4.1. Силы трения
в газовом потоке

коэффициент вязкости зависит от температуры. При увеличении температуры коэффициенты вязкости газов возрастают, а у жидкостей уменьшаются.

С молекулярно-кинетической точки зрения внутреннее трение в газах обусловлено наложением направленного движения слоев газа с различными скоростями и хаотического теплового движения молекул, которое приводит к обмену молекулами между слоями. В результате такого обмена импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а импульс слоя, движущегося медленнее, наоборот, увеличивается.

Молекулярно-кинетическая теория дает для динамического коэффициента вязкости идеального газа такое выражение:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

Соотношение (4.1) справедливо, если значение $\langle l \rangle$ мало по сравнению с размерами сосуда, в котором газ находится.

Плотность газа

$$\rho = n m_0, \quad (4.2)$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы.

Средняя арифметическая скорость движения молекул газа зависит от его температуры T и массы молекулы m_0 :

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \quad (4.3)$$

где k – постоянная Больцмана.

Средняя длина свободного пробега молекул зависит от их эффективного диаметра d и концентрации n :

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (4.4)$$

Подставляя выражения (4.2), (4.3) и (4.4) в формулу (4.1), получаем

$$\eta \sim \frac{\sqrt{m_0}}{d^2} \sqrt{T}.$$

4.2. Экспериментальная установка

В лабораторной работе требуется определить коэффициент вязкости воздуха. Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 4.2, состоит из капилляра 1,

микроманометра 2, соединительных трубок 3 и цилиндрического сосуда 4. В сосуд предварительно наливают воду. Если слегка приоткрыть кран К, то вода начнет медленно вытекать из сосуда. Уровень жидкости в сосуде будет понижаться. Понизится и давление над уровнем жидкости в сосуде и трубках, соединяющих сосуд с микроманометром и капилляром. По капилляру возникнет течение воздуха

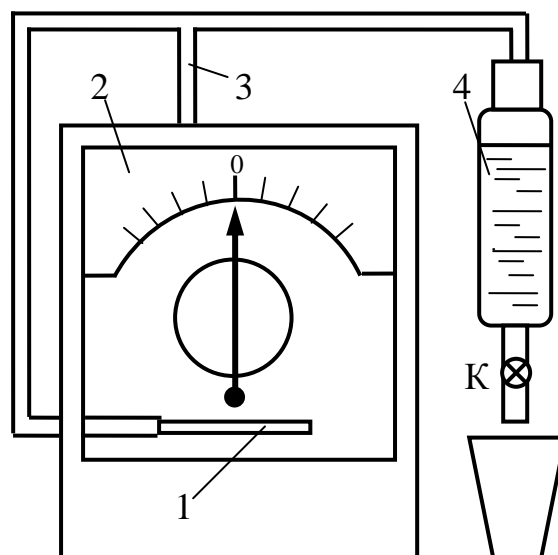


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

в область пониженного давления, микроманометр при этом будет показывать разность давлений на концах капилляра. Длина и радиус капилляра указаны на лицевой панели микроманометра.

Если режим установившегося течения газа в капилляре является ламинарным, то динамический коэффициент вязкости можно определить, используя формулу Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 l V}, \quad (4.5)$$

где r – радиус капилляра; Δp – перепад давлений на концах капилляра; l – длина капилляра; V – объем газа, прошедшего через капилляр за время τ .

Судить о режиме течения можно, рассчитав безразмерную величину

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}, \quad (4.6)$$

где ρ – плотность газа; v – скорость течения газа по капилляру; d – диаметр капилляра.

Эту безразмерную величину называют критерием Рейнольдса. Ламинарный режим течения наблюдается, если $Re < 2000$, а турбулентный – если $Re > 2000$.

4.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

4.3.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

4.3.2. Приоткрывая кран К, добиться такой скорости истечения жидкости из сосуда, чтобы перепад давлений на концах капилляра был не менее $2/3$ предельного значения по шкале микроманометра.

4.3.3. Убедившись в том, что стрелка микроманометра установилась и не меняет своего положения, подставить под вытекающую из сосуда жидкость вместо лабораторного стакана мензурку и включить секундомер. Измерить время τ , в течение которого в мензурку набирается $30\text{--}50\text{ см}^3$ жидкости (такой же объем газа проходит за это время через капилляр). Закрывать кран К и пополнить сосуд водой, доводя ее уровень до исходного положения.

4.3.4. Повторить опыт не менее четырех раз. Для всех опытов рассчитать динамический коэффициент вязкости по формуле (4.5). Результаты измерений и расчетов записать в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	$l = \dots\dots\dots; \quad r = \dots\dots\dots$			
	Δp	τ	V	η

4.3.5. Рассчитать среднее арифметическое из всех измеренных значений η .

4.3.6. Оценить случайную абсолютную и относительную погрешности измерения η .

4.3.7. Используя справочные и экспериментальные данные, рассчитать по формуле (4.6) для одного из опытов критерий Рейнольдса. Убедиться в том, что режим течения газа по капилляру является ламинарным.

4.3.8. Используя справочное значение эффективного диаметра молекул азота, выполнить расчеты по формуле (4.4) и сопоставить среднюю длину пробега молекул азота с диаметром капилляра.

4.3.9. Проанализировать полученные результаты.

4.4. Контрольные вопросы

1. Что понимают под внутренним трением? Чем обусловлено внутреннее трение в газах с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

2. Что понимают под эффективным диаметром молекулы? Под длиной свободного пробега молекулы?

3. В каких единицах Международной системы (СИ) выражают динамический коэффициент вязкости?

4. Зависит ли динамический коэффициент вязкости газа от его температуры и давления? Если зависит, то как?

5. Какой режим течения газа (жидкости) называют ламинарным? Турбулентным?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Коэффициенты Стьюдента

Число измерений	Доверительная вероятность α				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
3	2,9	4,3	7,0	9,9	32
4	2,4	3,2	4,5	5,8	13
5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,7
6	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
∞	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Таблица 2

Значения плотности ρ , эффективного диаметра d молекул и динамического коэффициента вязкости η некоторых газов при нормальных условиях

Вещество	ρ , кг/м ³	$d \cdot 10^9$, м	$\eta \cdot 10^5$, Па·с
Азот	1,25	0,37	1,67
Воздух	1,29	–	1,72
Кислород	1,43	0,35	1,92

Таблица 3

Значения коэффициента диффузии D паров этанола (C₂H₅OH) в воздухе при различных температурах t и давлении $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па

t , °C	14	16	18	20	22	24	26
$D \cdot 10^5$, м ² /с	1,15	1,16	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23

Таблица 4

Значения плотности ρ и динамического коэффициента вязкости η воды при различных температурах t и давлении $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па

t , °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
ρ , кг/м ³	998,2	997,1	995,7	994,1	992,2	990,2	988,1	985,7	983,1	980,5	977,8
$\eta \cdot 10^3$, Па·с	1,004	0,894	0,801	0,722	0,653	0,599	0,549	0,506	0,470	0,435	0,406

Таблица 5

Коэффициенты теплопроводности некоторых металлов

Вещество	Алюминий	Латунь	Бронза	Сталь
λ , Вт/(м·К)	160 – 210	70 – 120	60 – 80	40 – 48

Таблица 6

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектриков

Вещество	Стекло	Картон	Пенопласт	Текстолит
λ , Вт/(м·К)	0,8 – 1,2	0,14 – 0,35	0,04 – 0,05	0,2 – 0,4