

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г.Белово
(филиал КузГТУ в г.Белово)

Кафедра горного дела и техносферной безопасности

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Теплофизика»
для обучающихся направления 20.03.01 «Техносферная безопасность»,
профиль 01 «Безопасность технологических процессов и производств»
всех форм обучения

Составитель: С.В. Белов

Рассмотрены на заседании кафедры
Протокол № 4 от 15.12.2020
Утверждены учебно-методическим
советом филиала КузГТУ в г.
Белово
Протокол № 5 от 17.12.2020

Белово 2020

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

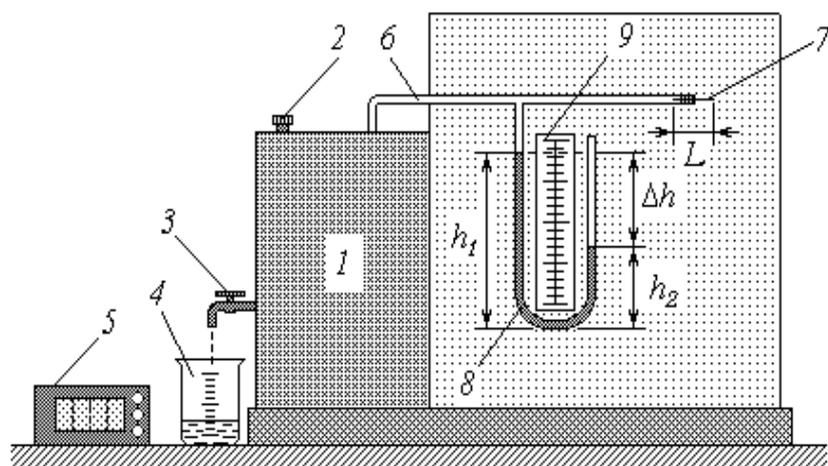
1. Цель работы: 1) изучение явления внутреннего трения в газах; 2) экспериментальное определение коэффициента вязкости воздуха; 3) оценка средней длины свободного пробега молекул и их эффективного диаметра.

2. Подготовка к работе: изучить по учебникам [1] §§128-132, [2] §§ 3.5, 10.6–10.9, [3] §§ 28, 31, 32, 46, 48.

Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) основные положения молекулярно-кинетической теории газов; б) объяснение явлений переноса (внутреннего трения, диффузии, теплопроводности) с точки зрения молекулярно-кинетической теории; в) вывод формулы Пуазейля; г) уметь пользоваться измерительными приборами и рассчитывать погрешности измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки



- 1 – резервуар;
- 2 – крышка;
- 3 – кран;
- 4 – мерный стакан;
- 5 – секундомер;
- 6 – трубка;
- 7 – капилляр;
- 8 – манометр;
- 9 – линейка.

Для определения коэффициента вязкости воздуха в лабораторной работе используется экспериментальная установка, основные элементы которой выполняют следующие функции.

В резервуар *1* заливается вода, после чего он герметично закрывается завинчивающейся крышкой *2*. Для слива воды предназначен кран *3*; мерный стакан *4* позволяет контролировать объем сливаемой воды V , а секундомер *5* – время ее истечения t . Воздух в

надводной части резервуара сообщается с атмосферой через трубку 6, в свободный конец которой вмонтирован капилляр (очень узкая стеклянная трубка) 7 длиной L . По мере вытекания воды из резервуара его надводный объем увеличивается, что приводит к падению в нем давления воздуха. При возникновении на концах капилляра перепада давлений Δp начинается всасывание воздуха. Для измерения перепада давлений Δp используется манометр 8, представляющий собой U-образную стеклянную трубку с подкрашенной водой. Одно колено манометра сообщается через трубку 6 с воздухом в резервуаре, а другое (открытое) – с атмосферой. Уровни воды в коленах манометра h_1 и h_2 измеряются с помощью линейки 9.

3.2. Методика измерений и расчётов

При понижении давления в резервуаре уровень воды в левом (на схеме) колене повышается, а в правом – понижается, пока давление столба воды $\Delta h = h_1 - h_2$ не уравнивает перепад давлений Δp :

$$\Delta p = \rho_g g (h_1 - h_2), \quad (1)$$

где ρ_g – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

В установившемся режиме объемный расход воздуха G (объем, протекающий за единицу времени) через капилляр равен объемному расходу вытекающей из резервуара воды:

$$G = \frac{V}{t}. \quad (2)$$

Очевидно, что величина G тем больше, чем больше перепад давлений Δp и внутренний радиус капилляра r , и тем меньше, чем длиннее капилляр и больше вязкость текущего воздуха η . Количественно взаимосвязь этих величин определяется *формулой Пуазейля*

$$G = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8L\eta}.$$

С учетом соотношений (1) и (2) эта формула примет вид

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi r^4 \rho_g g (h_1 - h_2)}{8L\eta}. \quad (3)$$

Зная геометрические размеры (длину L и радиус r) капилляра и измеряя величины V , t , h_1 и h_2 , с помощью формулы (3) можно найти коэффициент вязкости воздуха:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho_g g (h_1 - h_2) t}{8LV}.$$

Значения L , r , g и ρ_g представляют собой константы; если в процессе опытов поддерживать неизменным освобождаемый объем V , то расчетную формулу для коэффициента вязкости можно представить в виде

$$\eta = C(h_1 - h_2)t, \quad (4)$$

где

$$C = \frac{\pi r^4 \rho_g g}{8LV}. \quad (5)$$

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

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle l \rangle \langle v \rangle, \quad (6)$$

где ρ – плотность газа; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул; $\langle v \rangle$ – средняя скорость их хаотического (теплового) движения. Из выражения (6) можно найти среднюю длину пробега:

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle}. \quad (7)$$

Плотность газа выразим из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

откуда

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT}, \quad (8)$$

где p – давление; V – объем; m – масса газа; μ – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Распределение молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла) позволяет найти среднюю скорость их теплового движения как

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (9)$$

Подставляя выражения (8) и (9) в (7), получим

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}. \quad (10)$$

В соответствии с теорией, средняя длина свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул идеального газа обратно пропорциональна их концентрации n и эффективному сечению σ , т.е. квадрату эффективного диаметра d_3 :

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_3^2 n},$$

откуда

$$d_3 = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}\pi n \langle l \rangle}}.$$

Учитывая известное соотношение

$$p = nkT,$$

где k – постоянная Больцмана, выразим концентрацию молекул через давление газа и его температуру:

$$n = \frac{p}{kT};$$

тогда

$$d_3 = \sqrt{\frac{kT}{\pi \sqrt{2} p \langle l \rangle}}. \quad (11)$$

3.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с рекомендациями по выполнению работы на данной установке. Выпишите в тетрадь геометрические размеры капилляра L и r , выразив их в метрах. Используя справочные материалы, спишите значения известных констант g , R , k , а также

плотность воды ρ_v . Молярную массу воздуха примите равной $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$. Запишите рекомендуемое значение объема выливаемой из резервуара воды V .

2. Рассчитайте по формуле (5) и запишите в тетрадь значение константы C (в Н/м^3).

3. Спишите с экрана монитора данные о параметрах окружающего воздуха.

4. Температуру воздуха T переведите из градусов Цельсия в кельвины, а давление p – из миллиметров ртутного столба в паскалы.

5. Подставьте под кран сливную емкость; откройте кран и следите за уровнями воды в манометре. После установления постоянных уровней подставьте под кран мерный стакан и одновременно включите секундомер. С помощью линейки определите и запишите в таблицу высоту уровней h_1 и h_2 , выразив эти значения в метрах. В момент наполнения стакана до заданного объема V выключите секундомер и закройте кран. Занесите в таблицу 1. показания секундомера t .

Таблица 1

Результаты измерений высоты уровней воды в манометре, времени наполнения водой сосуда и расчета вязкости воздуха

Номер опыта	h_1 , м	h_2 , м	t , с	η , мкПа·с	$\Delta\eta$, мкПа·с	$(\Delta\eta)^2$, (мкПа·с) ²
1						
2						
...
5						
$\Sigma =$					$\Sigma =$	

5. Повторите описанный в п. 5 опыт еще четыре раза, стараясь устанавливать различный расход воды из крана (а значит, различный перепад уровней воды в манометре).

3.4. Обработка результатов измерений

1. Для каждого из пяти проделанных измерений вычислите коэффициент вязкости воздуха по формуле (4) и занесите его в таблицу. Для удобства записи и дальнейших расчетов переведите полученные значения в $мкПа \cdot с$.

2. Найдите среднее значение коэффициента вязкости $\bar{\eta}$. Выполните все расчеты, необходимые для оценки случайной погрешности определения величины η . Задаваясь доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, рассчитайте погрешность $\Delta_s \eta$.

3. Определите абсолютные приборные ошибки прямых измерений уровней воды δh , радиуса δr и длины δL капилляра, объема выливаемой воды δV и времени ее истечения δt , а также относительные ошибки

$$E_h = \frac{2\delta h}{h_1 - h_2}, \quad E_r = \frac{\delta r}{r}, \quad E_L = \frac{\delta L}{L}, \quad E_V = \frac{\delta V}{V} \quad \text{и} \quad E_t = \frac{\delta t}{t}.$$

4. Найдите абсолютную приборную погрешность косвенного измерения коэффициента вязкости $\delta \eta$. Для этого, если потребуются, используйте формулу

$$\delta \eta = \bar{\eta} \sqrt{E_h^2 + (4E_r)^2 + E_L^2 + E_V^2 + E_t^2}.$$

5. Оцените полные абсолютную Δ и относительную E погрешности. Сделав необходимые округления, запишите окончательный результат измерения коэффициента вязкости воздуха. Сравните полученное значение с табличным.

6. Подставляя в формулу (10) среднее значение коэффициента вязкости $\bar{\eta}$ (в $Па \cdot с$), оцените среднюю длину свободного пробега молекул воздуха $\langle l \rangle$, а затем по формуле (11) – их эффективный диаметр d_s . Сравните полученные результаты с данными, имеющимися в учебной литературе. Сделайте выводы.

4. Вопросы для самоподготовки

1. Перечислите явления переноса. При каких условиях они возникают?
2. Запишите уравнения диффузии, внутреннего трения и теплопроводности. Что переносится в каждом из указанных явлений?
3. Каков физический смысл коэффициентов диффузии, внутреннего трения и теплопроводности?
4. Какова причина возникновения внутреннего трения? В чем отличие механизма возникновения силы внутреннего трения в газах и жидкостях?
5. Выведите формулу Пуазейля для определения объема жидкости, протекающей по трубе за единицу времени.
6. От каких параметров зависит коэффициент внутреннего трения? Каков характер зависимости коэффициента внутреннего трения жидкости от температуры?
7. Какое течение жидкости называют ламинарным? Турбулентным?
8. Назовите критерий определения характера течения жидкости.
9. Как зависит коэффициент теплопроводности от температуры?

5. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие : в 3 томах / И. В. Савельев. — 19-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2019 — Том 1 : Механика. Молекулярная физика — 2020. — 436 с. — ISBN 978-5-8114-5539-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/142380> (дата обращения: 19.10.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Детлаф, А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для вузов/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. — 6-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2007. — 720 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 18-е изд., стер. — М.: ИЦ Академия, 2010. — 560 с.

Составитель

Белов Сергей Викторович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Теплофизика»
для обучающихся направления 20.03.01 «Техносферная безопасность»,
профиль 01 «Безопасность технологических процессов и производств»
всех форм обучения

Отпечатано на ризографе.

Тираж экз.

Филиал ГУ КузГТУ в г. Белово. 652644, г. Белово, ул. Ильича 32-а

