

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра общей физики–2

А. В. Бармасов, С. О. Высоцкая, Д. А. Лисаченко,
С. А. Кудря, А. Н. Подсевальникова, Т. В. Рудакова

Описания лабораторных работ
Учебной лаборатории физического эксперимента
СПбГУ

Часть III

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург
2024

УДК 539.1
ББК 22.3
О61

*Печатается по решению
Учёного совета физического факультета СПбГУ
от 17 января 2024 года*

*Содержание одобрено Учебно-методической комиссией по УГСН 03.00.00
Физика и астрономия и УГСН 14.00.00 Ядерная энергетика и технологии*

Рецензенты:

к.ф.-м.н., ст. преподаватель кафедры общей физики-2 СПбГУ

Зароченцева Елена Петровна

к.ф.-м.н., доцент СПбГУ

Цыганенко Наталия Михайловна

Авторы: А. В. Бармасов, С. О. Высоцкая, С. А. Кудря, Д. А. Лисаченко,
А. Н. Подсевальникова, Т. В. Рудакова

О61 **Описания лабораторных работ Учебной лаборатории физического эксперимента физического факультета СПбГУ. Часть III: Молекулярная физика: Учебное пособие / А. В. Бармасов, С. О. Высоцкая, Д. А. Лисаченко, С. А. Кудря, А. Н. Подсевальникова, Т. В. Рудакова. — СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. — 71 с.**

ISBN 978-5-9651-1548-8

Пособие содержит описания семи лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика» курса общей физики и представляет собой существенно переработанное и дополненное переиздание учебного пособия «Молекулярная физика. Часть III». (СПб: Изд-во ВВМ, 2016. — 48 с.). Каждая лабораторная работа рассчитана на 4 академических часа. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям: география, геология, лечебное дело, гидрометеорология, экология и природопользование, картография и геоинформатика и т.д. В методическое пособие включены краткие теоретические введения по темам предлагаемых работ.

© А. В. Бармасов, С. О. Высоцкая,
Д. А. Лисаченко, С. А. Кудря,
А. Н. Подсевальникова, Т. В. Рудакова, 2024

ISBN 978-5-9651-1548-8

© СПбГУ, 2024

Содержание

Тема: ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ	5
Введение	5
<i>Лабораторная работа 15</i>	
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В МЕТАЛЛАХ.	9
<i>Лабораторная работа 16</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ С НИЗКОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕЙ	18
Тема: ДВИЖЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	23
Введение	23
<i>Лабораторная работа 17</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА	27
Тема: ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ	33
Введение	33
<i>Лабораторная работа 18</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА	42
<i>Лабораторная работа 19</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КАПИЛЛЯРА И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ.	48
Тема: ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ	52
Введение	52
<i>Лабораторная работа 21</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО И ОБЪЁМНОГО РАСШИРЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НАГРЕВАНИИ	57

Тема: ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА	62
Введение	62
<i>Лабораторная работа 23</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ГАЗА. РАСЧЁТ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ГАЗА	64
Литература	71

Тема: ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Введение

Перенос теплоты осуществляется с помощью теплопередачи.

Теплопередача — это процесс переноса теплоты внутри тела или от одного тела к другому, обусловленный разностью температур. Интенсивность переноса теплоты зависит от свойств вещества, разности температур и подчиняется экспериментально установленным законам природы.

В одних случаях теплообмен нежелателен (например, теплоизоляция плавильных печей, космических кораблей и т. п.), а в других он должен быть как можно больше (например, паровые котлы, теплообменники, кухонная посуда).

Существуют три основных вида **теплопередачи**: теплопроводность, конвекция и лучистый теплообмен (Рис. 1).

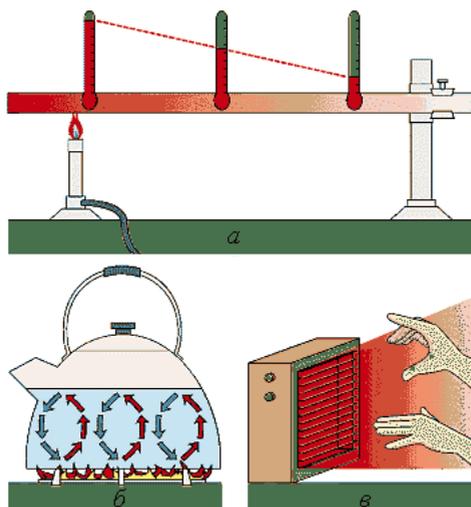


Рис. 1. Три вида теплопередачи: *а* — теплопроводность; *б* — конвекция; *в* — лучистый теплообмен.

В **твёрдом** теле, в отличие от жидкостей или газов, перенос тепла осуществляется только за счёт **теплопроводности**.

Если внутри тела имеются области с разными температурами, то тепловая энергия переходит от более горячей его части к более холодной. Такой вид теплопередачи, протекающий при наличии градиента температуры и обусловленный тепловыми движениями и столкновениями молекул, называется **теплопроводностью**.

Интенсивность теплопередачи за счёт **теплопроводности** зависит от градиента температуры, т. е. отношения $\frac{dT}{dx}$ (разности температур между областями к расстоянию между ними). Она зависит так же от площади поперечного сечения тела и коэффициента теплопроводности материала. Отсюда следует **уравнение теплопроводности (закон) Фурье**:

$$\Delta Q = -\lambda_{\text{в}} \frac{dT}{dx} S \Delta t, \quad (1)$$

где ΔQ — количество теплоты, переносимое через площадь сечением S за время Δt ; $\lambda_{\text{т}}$ — **коэффициент теплопроводности**, зависящий от свойств вещества.

Знак «минус» в (1) указывает на то, что теплопередача направлена в сторону убыли температуры (противоположно градиенту температуры).

Закон Фурье справедлив не только для твёрдых тел, но и для жидкостей и газов. Однако для жидкостей и газов при использовании закона Фурье нужно быть весьма внимательным — для них она применима только в том случае, если не происходит перемещения вещества, т. е. конвекции.

Размерность коэффициента теплопроводности в системе СИ: $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ или $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Поток энергии, переносимой в процессе теплопередачи (теплообмена), называется **тепловым потоком** (или тепловой мощностью, или потоком теплоты, или скоростью распространения тепла) и обычно обозначается q или Φ .

Плотностью теплового потока (часто просто тепловым потоком) называется количество тепловой энергии, переносимое через единичную поверхность, перпендикулярную направлению переноса, в единицу времени. Часто обозначается J_q или просто q , или ϕ .

Тепловой поток измеряется в Вт, а плотность теплового потока в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Выражение (1) позволяет найти плотность теплового потока (тепловой поток через единицу площади за единицу времени):

$$J_q \equiv \frac{\Delta Q}{S \Delta t} = -\lambda_{\text{в}} \frac{dT}{dx}. \quad (2)$$

Отсюда:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\Delta Q}{\left| \frac{dT}{dx} \right| S \Delta t}. \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{т}}$ численно равен количеству теплоты Q , переносимому через единицу площади за единицу времени при единичном градиенте температуры.

Теплопроводность вещества зависит от его состояния.

Твёрдые тела, особенно металлы, имеют наибольшую теплопроводность (см. табл. 1). У жидкостей, за исключением расплавленных металлов, например, ртути, теплопроводность невелика. У газов теплопроводность ещё меньше. Знание о внутреннем строении вещества позволяет объяснить эти различия. Если молекулы находятся относительно далеко друг от друга (жидкость в сравнении с твёрдыми телами, или газ в сравнении с жидкостью и твёрдым телом), соударения молекул происходят реже. Энергия от одних молекул к другим передаётся медленнее.

Таблица 1. Коэффициент теплопроводности и удельное электрическое сопротивление (для металлов)

Вещество	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{т}}$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Алюминий	205÷220	$(2,6\div3,2)\cdot 10^{-8}$
Медь	385 (18 °С)	$(1,7\div1,8)\cdot 10^{-8}$
Серебро	459 (0 °С)	$(1,59\div1,66)\cdot 10^{-8}$
Железо	74÷167	$(9,7\div9,8)\cdot 10^{-8}$
Латунь	85 ÷110	$(1,8\div8,0)\cdot 10^{-8}$
Свинец	35	$20,7\cdot 10^{-8}$ (20 °С)
Дерево поперёк волокон	0,17	
Дерево вдоль волокон	0,29	
Кирпич	1,25	
Стекло	0,85	
Вода	0,63	
Воздух	0,025	

Теплопроводность металлов обусловлена не только колебаниями кристаллической решётки, но и движением большого числа квазисвободных

электронов (называемых иногда **электронным газом**). Движение электронов ответственно и за электропроводность металлов, а потому неудивительно, что хорошие проводники теплоты (например, серебро или медь) являются также хорошими проводниками электричества (Табл. 1).

Лабораторная работа 15

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В МЕТАЛЛАХ

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с введением по теме: «Теплопроводность твёрдых тел».

Цель работы: измерить теплопроводность в металлических стержнях.

Физическое обоснование эксперимента

Теплопроводность предполагает перенос тепла от более горячей части тела в более холодную область посредством взаимодействия между соседними атомами или молекулами, при этом сами атомы остаются на своих местах. В цилиндрическом металлическом стержне, на концах которого поддерживаются разные температуры, через некоторое время возникает перепад температуры по его длине. Температура уменьшается равномерно от тёплого конца к холодному, и в стержне возникает постоянный поток тепла. При постоянном количестве подводимого тепла, через некоторое время в стержне устанавливается стационарное состояние, т.е. зависимость температуры от координаты становится линейной, а градиент температуры $\frac{dT}{dx}$ — величиной постоянной.

Пусть площадь поперечного сечения исследуемого стержня S . В течение промежутка времени dt через поперечное сечение стержня проходит количество теплоты ΔQ и в нём возникает постоянный поток теплоты Φ_Q :

$$\Phi_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda_T \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (15.1)$$

где Φ_Q — поток теплоты (измеряемый в ваттах); S — площадь поперечного сечения стержня; λ_T — коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен стержень; T — температура; x — координата по длине стержня.

До того, как появляется постоянный перепад температуры, распределение температуры в определённый момент времени t определяется функцией

$T(x, t)$, которая постепенно приближается к установившемуся состоянию. До установления равновесия справедливо следующее дифференциальное уравнение:

$$\lambda_T \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = 0, \quad (15.2)$$

где c — удельная теплоёмкость; ρ — плотность материала, из которого изготовлен стержень.

В установившемся состоянии, в соответствии с уравнением (15.1), ситуация описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) &= 0, \\ \lambda_T \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x, t) &= \text{const} = \frac{\Phi_0}{S}. \end{aligned} \quad (15.3)$$

В данной работе стержень нагревается на одном конце электрическим способом. Регулируемый при помощи электронного прибора источник тепла обеспечивает подачу в стержень некоторого количества теплоты, которое определяется мощностью $P_{\text{эл}}$ источника, а её можно определить, измерив напряжение нагревателя U и его силу тока I :

$$P_{\text{М}} = U \cdot I. \quad (15.4)$$

На другом конце стержня поддерживается температура плавления льда. Теплоизолирующая оболочка сводит к минимуму потерю тепла от стержня в окружающую среду и обеспечивает более линейное распределение температуры в установившемся состоянии. С помощью электронного термометра, который определяет температуру, измеряются температуры в заранее заданных точках измерения вдоль стержня.

На рис. 15.1 показаны изменения температуры вдоль теплопроводящего стержня в пяти сериях измерений. Чёрными точками обозначена линия, соответствующая установившемуся процессу.

Из формулы 15.1 следует

$$\lambda_B = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{dx}{dT} \cdot \frac{1}{S}, \quad (15.5)$$

где поток теплоты определяется мощностью источника тепла $P_{\text{эл}}$. Поскольку в стационарном состоянии $\frac{dT}{dx} = \text{const}$, последнюю формулу можно преобразовать:

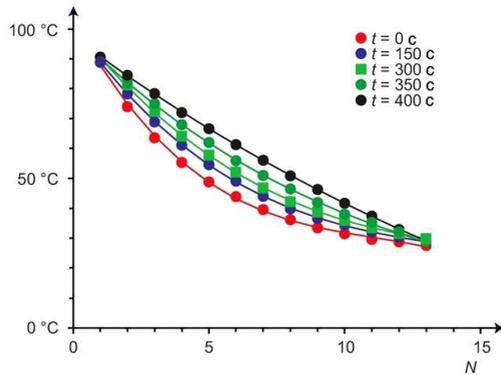


Рис. 15.1. Температура вдоль теплопроводящего стержня в пяти сериях измерений, выполненных с течением времени интервалом 150 с.

$$\lambda_{\tau} = \frac{P_{эл}}{S} \cdot \frac{L}{T(0) - T(L)}, \quad (15.6)$$

где L — расстояние между точками, в которых измеряются температуры $T(0)$ и $T(L)$.

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки представлен на рис. 15.2.



Рис. 15.2. Схема установки.

В комплект входят: источник питания постоянного тока (0÷20 В, 0÷5 А, 230 В, 50/60 Гц), теплопроводящие стержни, цифровой быстродействующий термометр, никель-хром-никелевый погружной датчик типа К с диапазоном измерения от 65 °С до 550 °С, соединительные провода, мерные стаканы.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Ознакомьтесь с установкой на лабораторном столе.
Не включайте заранее источник питания.

Подготовка

1. Подготовьте таблицы (см. табл. 1 и 2), в которые будете записывать результаты измерений. Укажите, из какого металла изготовлен стержень (алюминий или медь). Убедитесь, что углубления на стержне заполнены белой пастой.
2. Подготовьте мелкие и крупные кусочки льда (примерно 250 г) и стакан с холодной водой (примерно 200 мл), секундомер и термометр, штангенциркуль и линейку.
3. Дальний от нагревателя (от источника питания) конец исследуемого стержня поместите в стакан с водой. Добавьте лёд. Смесь вода-лёд должна полностью закрывать ножки стержня. Кусочки льда могут выступать (значительно) выше уровня воды. Начитается процесс охлаждения стержня.
4. Пока идёт охлаждение помещённого в смесь вода-лёд конца стержня, проведите измерение диаметра стержня штангенциркулем. Измерьте расстояние между двумя соседними углублениями (ямками) на стержне штангенциркулем или линейкой. На стержне 13 ямок. Для расчётов нужны площадь сечения торца стержня и расстояние между первым и последним углублениями на стержне.

Этап первый

1. Включите источник питания. Регуляторами тока или/и напряжения установите: для стержня из алюминия — $U = 12,5 \text{ В}$, $I = (3,33\text{--}3,35) \text{ А}$; для стержня из меди — $U = 15 \text{ В}$, $I = 4,1 \text{ А}$.

ВНИМАНИЕ. В этой работе следует внимательно соблюдать рекомендации, касающиеся времени измерений. Хотя для расчётов время не исполь-

зуются, однако при увеличении времени возрастают потери, которые невозможно учесть. За время меньше 10 секунд термодатчик не успевает принять реальное значение температуры.

2. Опустите кончик термодатчика термометра в первое углубление на стержне. Наблюдайте, как идёт нагревание стержня источником питания. По скорости смены показаний термометра Вы увидите, что термодатчику требуется не менее 15–20 секунд для того, чтобы термометр показал установившуюся температуру (прогрелся). Кончик термодатчика всё время находится в первой ямке, не вынимайте его.
3. Когда температура в первой ямке достигнет (30–50) °С, проведите серию измерений в соответствии с табл.1. Закончив эту серию измерений, снова поместите кончик термодатчика в первое углубление на стержне.

Таблица 1. Кривая нагревания. Одна серия.

№ ямки	1	2	3	4	5	...	9	10	11	12	13
Время, сек*	0–30	30–40	40–50	50–60	60–70	...	100–110	110–120	120–130	130–140	140–150
Температура, °С											

*— время — (по секундомеру) — начало интервала соответствует моменту, когда кончик термодатчика устанавливается в углубление на стержне; конец интервала — следует БЫСТРО перенести кончик термодатчика в следующее углубление на стержне, ЗАПИСАВ показания в графу температур соответствующей ямки. В первой ямке кончик термодатчика находится большее время — 30 сек, в каждой следующей — по 10 сек. Кончик термодатчика держать в углублении в течение всего интервала времени.

Эта серия просто демонстрирует, как идёт нагрев, виден изгиб на графике — т. е. передача тепла по стержню «не равномерная». Она полезна для тренировки, чтобы приноровиться к измерениям и для обсуждения с преподавателем. Её можно не делать, если решит преподаватель, так как аналогом будет 1 серия в основных измерениях.

Этап второй (основной)

1. Внимательно следите за показаниями термометра. В тот момент, когда температура достигла 93°С, измените ток и напряжение источника питания. Для стержня из алюминия — $U=9,5$ В, $I=(2,36-2,37)$ А. Для стержня из меди — $U=9,8$ В, $I=2,5$ А
2. Кончик термодатчика всё время находится в первой ямке. Температура

сразу начинает уменьшаться. Без промедления приступите к основным измерениям в соответствии с табл. 2. Эти серии соответствуют изучаемому процессу передачи тепла внутри стержня. Процесс очень быстрый, перерывов между сериями нет.

3. Сразу после последнего измерения в серии (13 ямка) кончик термодатчика перенесите в первое углубление стержня — это соответствует началу следующей серии. Серией считается последовательность измерений значений температур в соседних ямках, начиная с первой и заканчивая 13-ой — таких серий 4 (длительность измерений указана в табл. 2).
4. Серии 5 – 10 (каждая) состоят из трёх измерений — это показания термометра в 1-й, 7-й (середина стержня) и 13-й ямках (перерывов между сериями нет, длительность измерений температуры в каждом углублении по 30 сек, смотри табл. 2).

Таблица 2. Основные измерения — передача тепла по стержню. 10 серий.

№ ямки	1	2	3	4...6	7	8	9	10	11	12	13
Время, сек*; 1 серия,	0– 30	30– 40	40– 50		80– 90	90– 100	100– 110	110– 120	120– 130	130– 140	140– 150
Темп., °С; 1 серия											
Время, сек; 2 серия	150– 180	180– 190	190– 200		230– 240	240– 250	250– 260	260– 270	270– 280	280– 290	290– 300
Темп., °С; 2 серия											
Время, сек; 3 серия	300– 330	330– 340	340– 350		380– 390	390– 400	400– 410	410– 420	420– 430	430– 440	440– 450
Темп., °С; 3 серия											
Время, сек; 4 серия	450– 480	480– 490	490– 500		530– 540	540– 550	550– 560	560– 570	570– 580	580– 590	590– 600
Темп., °С; 4 серия											
Время, сек; 5 серия	600– 630				630– 660						660– 690
Темп., °С; 5 серия											
Время, сек; 6 серия	690– 720				720– 750						750– 780

№ ямки	1	2	3	4...6	7	8	9	10	11	12	13
Темп., °С; 6 серия											
Время, сек; 7 серия	780– 810				810– 840						840– 870
Темп., °С; 7 серия											
Время, сек; 8 серия	870– 900				900– 930						930– 960
Темп., °С; 8 серия											
Время, сек; 9 серия	960– 990				990– 1020						1020– 1050
Темп., °С; 9 серия											
Время, сек; 10 серия	1050– 1080				1080– 1110						1110– 1110
Темп., °С; 10 серия											

*— время — (по секундомеру) — начало интервала соответствует моменту, когда кончик термодатчика устанавливается в углубление на стержне; конец интервала — следует **БЫСТРО** перенести кончик термодатчика в следующее углубление на стержне, **ЗАПИСАВ** показания в графу температур соответствующей ямки. Для 1–4 серий в первой ямке кончик термодатчика находится большее время — 30 сек, в каждой следующей ямке — по 10 сек. Серии 5–10 по три измерения — 1, 7, 13 ямки (длительность каждого по 30 сек). Каждая следующая серия начинается **СРАЗУ** после предыдущей. Кончик термодатчика держать в углублении в течение всего интервала времени.

1. Запишите значения тока и напряжения (при которых проводились измерения 1–10 серии) — они потребуются при проведении расчётов.
2. Выключите источник питания.
3. По экспериментальным данным табл. 1 постройте график зависимости температуры в ямке на стержне от её положения. Проанализируйте эту зависимость.
4. По данным табл. 2 постройте на одном рисунке графики **всех** серий зависимостей температуры в ямке на стержне от её положения (срав-

ните с рис. 15.1). Проанализируйте графики. Объясните, почему наблюдается изменение характера зависимости температуры в ямке на стержне от её положения.

5. По сериям 5–10 (это уже линейные зависимости — графики подтверждают линейность) рассчитайте коэффициенты наклона (тангенс угла наклона) этих прямых. Объясните, почему коэффициент отрицательный. Усредните полученные значения. Это температурный градиент. Обозначим его $n = \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{\Delta x}$. Здесь ΔT — разность температур в крайних ямках, Δx — расстояние между ними.
6. Рассчитайте погрешность градиента температуры.
7. Используя результаты пункта 9, рассчитайте по формуле 15.6 величину коэффициента теплопроводности.
8. Погрешность коэффициента теплопроводности рассчитайте по формуле переноса ошибок. Погрешность мощности определяется через погрешность тока и напряжения. Погрешность площади — через диаметр.

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2} \quad (15.7)$$

Содержание отчёта

1. Название, номер лабораторной работы.
2. Схема установки.
3. Параметры и характеристики используемых приборов.
4. Рабочие формулы для выполнения расчётов.
5. Таблица с результатами измерений и вычислений.
6. Графики полученных зависимостей.
7. Вычисление погрешностей измерений.
8. Окончательные результаты.
9. Сопоставление полученных величин со справочными значениями.
10. Предложите объяснение возможных отличий полученных Вами данных от приведённых справочных значений.
11. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- ? Какие механизмы теплопроводности Вы знаете?
- ? Чем отличается теплопроводность твёрдых тел от теплопрово-

дности идеальных газов?

- ? Чем отличается теплопроводность диэлектриков от теплопроводности металлов?
- ? Каким уравнением описывается процесс теплопроводности в твёрдых телах?

Лабораторная работа 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ С НИЗКОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕЙ

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с введением по теме: «Теплопроводность твёрдых тел».

Цель работы: определить коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлена исследуемая пластинка.

Физическое обоснование эксперимента и описание установки

Для проведения эксперимента используется установка, изображённая на рис. 16.1. Толстый латунный диск **A** подвешен горизонтально на трёх нитях, прикрепленных к кольцу, установленному на двух стойках. На диск **A** кладут исследуемую пластинку (эбонитовую или пластмассовую) **B** и поверх неё ставят цилиндрическую латунную коробку **C** с толстым дном. В диске **A** и в дне коробки **C** имеются боковые отверстия, в которые могут быть вставлены датчики измерителей температуры диска и дна коробки.

В данной работе для измерения температуры используется полупроводниковый датчик с электронным цифровым измерителем, либо два терморезистора, которые через переключатель соединены с цифровым прибором В7–38, включённом в режиме измерения их сопротивления. В случае использования терморезисторов, искомые температуры определяются из градуировочных графиков зависимости сопротивления терморезисторов от температуры.

Через патрубок L_1 внутрь коробки подаётся пар от колбы с кипящей водой. Пар нагревает коробку **C** и вместе с образующимся конденсатом удаля-

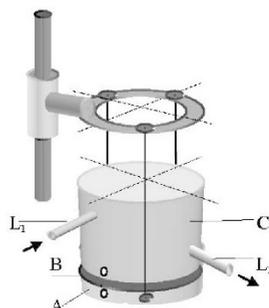


Рис. 16.1

ется через патрубок L_2 . Вследствие этого между верхней и нижней поверхностями исследуемой пластинки создаётся разность температур, и через неё в направлении сверху вниз переносится поток тепла.

Через некоторое время после начала нагревания в системе устанавливается стационарное состояние, при котором температура T_1 верхней латунной коробки и температура T_2 нижнего латунного диска остаются постоянными во времени. Так как исследуемая пластинка однородна, градиент температуры можно определить как $(T_1 - T_2)/x$, где x — толщина пластинки. Тогда уравнение (1) введения можно переписать в виде

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{x} S = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{x} \cdot \frac{\pi d^2}{4}, \quad (16.1)$$

где dQ/dt — поток тепла, который переносится через исследуемую пластинку, S и x — соответственно площадь и толщина этой пластинки, d — её диаметр, равный диаметру диска A .

В соответствии с этим уравнением для определения коэффициента теплопроводности необходимо измерить T_1 , T_2 , x , d и определить поток тепла. Диаметр и толщину пластинки измеряют штангенциркулем. Температуру определяют с использованием терморезисторов или полупроводникового датчика.

Для определения количества тепла, переносимого через исследуемую пластинку в единицу времени, необходимо провести дополнительные измерения.

При установившемся в системе стационарном режиме температура нижнего диска остаётся постоянной. Это означает, что количество теплоты, излучаемое с открытых поверхностей этого диска в единицу времени, равно потоку теплоты, подводимому к нему через исследуемую пластинку. Следовательно, для определения искомого потока теплоты достаточно определить количество теплоты, излучаемое с открытых поверхностей диска A за единицу времени при температуре T_2 . Это количество теплоты можно вычислить, если знать скорость изменения температуры этого диска при его остывании в области температур вблизи T_2 .

Если с диска A снять пластинку B и коробку C , то тепло будет отводиться не только через нижнюю и боковую его поверхности, но и через верхнюю. Благодаря конвекции, через верхнюю поверхность тепло уносится более эффективно, чем через другие. Чтобы условия охлаждения не изменились после того, как с диска A снимается коробка C и пластинка B , на диск помещается пенопластовый цилиндр, обладающий очень низкой теплопроводностью. Затем измеряется температура диска в зависимости от времени охлаждения.

Прежде чем исследовать эту зависимость, необходимо предварительно нагреть диск с помощью коробки с паром до температуры несколько выше температуры T_2 .

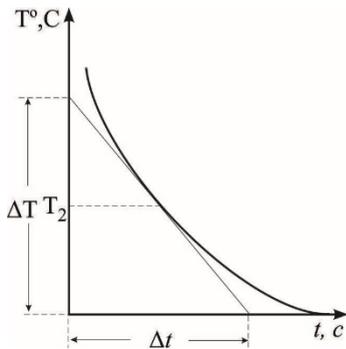


Рис. 16.2.

Затем измеряется температура диска при остывании в зависимости от времени $T = f(t)$ (рис. 16.2).

Зависимость эта не является линейной, и скорость остывания $n = dT / dt$ в каждой точке графика различна. Скорость остывания при температуре T_2 можно определить как тангенс угла наклона касательной к полученному графику в точке, соответствующей температуре T_2 : $n = \Delta T / \Delta t$ (рис. 16.2).

Тепло, отданное телом при изменении его температуры на dT , равно $dQ = mC dT$, где m — масса диска, C — удельная теплоёмкость латуни, из которой он сделан ($C = 286$ Дж/(кг·К)). Тогда в единицу времени диск теряет за счёт излучения количество теплоты

$$\frac{dQ}{dt} = mC \frac{dT}{dt} = mCn. \quad (16.2)$$

При условии, что скорость остывания измерена при температуре T_2 , можно приравнять правые части уравнений (16.2) и (16.1):

$$mCn = \lambda \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{T_1 - T_2}{x}.$$

Тогда

$$\lambda = \frac{4mCnx}{(T_1 - T_2)\pi d^2}. \quad (16.3)$$

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Проверить уровнем горизонтальность подвешенного диска А.
2. На диск положить исследуемую пластинку. Опустить коробку С с присоединённым паропроводом.

3. Включить кипятильник в сеть, предварительно убедившись в наличии в колбе воды.
4. Прогреть всю систему, пропуская пар через цилиндрическую латунную коробку С, следя за тем, чтобы в паропроводе не образовывались водяные пробки.
5. Нагреть всю систему до тех пор, пока температуры цилиндрической коробки T_1 и диска T_2 не перестанут изменяться. Записать эти температуры. Их определяют либо по показаниям цифрового термометра, либо по измеренным сопротивлениям полупроводниковых терморезисторов, находящихся в цилиндрических углублениях коробки и диска.
6. Удалить исследуемую пластинку, поставить латунную коробку С непосредственно на нижний диск и нагреть его до температуры на 8 – 10 градусов выше температуры T_2 .
7. Снять нагреватель, накрыть диск пенопластовым цилиндром и следить за остыванием диска, записывая его температуру через каждые полминуты до тех пор, пока диск не охладится на 8 ± 10 градусов ниже температуры T_2 .
8. Построить кривую охлаждения (см. рис. 16.2) и, пользуясь ею, определить скорость охлаждения диска n при температуре, приблизительно равной T_2 .
9. Измерить диаметр и толщину исследуемой пластинки. Масса латунного диска указана на установке.
10. Рассчитать коэффициент теплопроводности исследуемого материала по формуле (16.3) и его погрешность по формуле:

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left[\frac{\Delta(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_2)}\right]^2} \quad (16.4)$$

Содержание отчёта

1. Температуры цилиндрической коробки T_1 и диска T_2 при наличии установившегося постоянного теплового потока, идущего от коробки к диску через исследуемую пластинку.
2. Таблица зависимости температуры латунного диска от времени при его остывании от температуры $(T_2 + 10)^\circ\text{C}$ до температуры $(T_2 - 10)^\circ\text{C}$ через 30 секунд.
3. График этой зависимости, по которому необходимо определить скорость охлаждения n , как тангенс угла наклона касательной к кривой охлаждения при температуре T_2 .

4. Измеренный диаметр и толщину исследуемой пластинки, а также массу латунного диска и значение удельной теплоёмкости латуни.
5. Расчёт коэффициента теплопроводности для исследуемого материала по формуле (16.3) и расчёт погрешности этого коэффициента по формуле (16.4).
6. Окончательный результат проведённого эксперимента в системе СИ и его погрешность ($\lambda \pm \Delta\lambda$).

Контрольные вопросы

- ? Чем отличается механизм теплопереноса в твёрдых телах и газах?
- ? Чем отличается теплопроводность изоляторов от теплопроводности металлов?
- ? Что можно сказать о потоках тепла, когда температура нижнего диска остаётся постоянной?
- ? С какой целью в работе предлагается определить скорость остывания пластины?

Тема: ДВИЖЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Введение

Если твёрдое тело находится внутри жидкости или газа, то вся его поверхность всё время соприкасается с частицами жидкости или газа. При движении тела на него со стороны жидкости или газа действуют силы, препятствующие движению. Эти силы называют сопротивлением среды. Как и силы трения, сопротивление среды всегда направлено против движения. Сопротивление среды можно рассматривать как один из видов сил трения. Особенностью сил трения в жидкости или газе является отсутствие трения покоя. Твёрдое тело, лежащее на другом твёрдом теле, может быть сдвинуто с места, только если к нему приложена достаточно большая сила, превосходящая наибольшую силу трения покоя. Картина получается иной, если тело находится в жидкости. В этом случае, чтобы сдвинуть с места тело, достаточно сколь угодно малых сил: хотя и с малым ускорением, но тело начнёт двигаться.

Если бы жидкость была лишена трения (трение в жидкости называют вязкостью), обусловленного взаимодействием частиц жидкости, линии тока огибали бы предмет максимально симметрично и плавно продолжались бы позади него. Все слои жидкости двигались бы с одинаковой скоростью, равной общей скорости, если не принимать во внимание некоторое повышение скорости около предмета, компенсирующее изменение сечения потока. Однако во всех реальных жидкостях существует внутреннее трение. Именно наличие у жидкости внутреннего трения изменяет картину линий тока и распределение скоростей в потоке. В очень медленно движущемся потоке линии тока плавно изгибаются вокруг предмета; в очень быстром потоке позади предмета они образуют сложный шлейф из вихрей.

Различают два вида движения вязкой жидкости — ламинарное и турбулентное. При ламинарном течении воображаемые слои жидкости как бы скользят относительно друг друга, не перемешиваясь. При турбулентном движении в жидкости образуются завихрения, где направление и величина вектора скорости, а также некоторые другие характеристики среды хаотически изменяются во времени и пространстве.

Рассмотрим ламинарное течение жидкости, находящейся между двумя большими (чтобы исключить влияние краёв) пластинами (рис. 1), одна из которых 2 неподвижна, а другая 1 движется в направлении X со скоростью u . Будем считать, что ни с чем, кроме пластин, жидкость не взаимодействует. Представим жидкость, состоящей из большого числа тонких параллельных слоёв площадью S . Пластина 1 при движении увлекает прилегающий слой, который, в свою очередь, увлекает за собой следующий слой и т. д. (см. рис. 1). Слои, непосредственно касающиеся пластин, движутся с их скоростями, а между ними скорость жидкости линейно меняется от 0 до u .

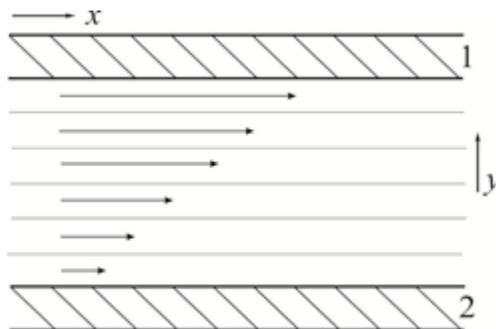


Рис. 1. Ламинарное плоское течение жидкости.

Величина du/dy , показывает как меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении, перпендикулярном движению.

Силы трения, возникающие в жидкостях и газах, называются силой вязкого трения. Опыт показывает, что **сила вязкого трения** зависит от скорости, причём эта зависимость обладает следующими свойствами: а) при $du/dy=0$ сила равна нулю; б) сила всегда направлена против скорости; в) сила плавно (при небольших скоростях — практически линейно) растёт со скоростью. Эти экспериментальные зависимости описываются формулой Ньютона для силы трения между слоями жидкости или газа:

$$F = \eta S \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

где S — площадь слоев, η — коэффициент, который обычно называют **коэффициентом вязкости, динамической вязкостью** или просто вязкостью. Вязкость численно равна силе внутреннего трения, действующей на единицу площади параллельно движущимся слоям жидкости или газа, при единичном градиенте скорости, перпендикулярном к границе слоёв.

Если жидкость течёт не между пластинами, а по цилиндрической трубке, трение возникает у её стенок, и в этом случае скорость максимальна вдоль оси трубки, а непосредственно у стенки скорость течения жидкости равна нулю (рис. 2).

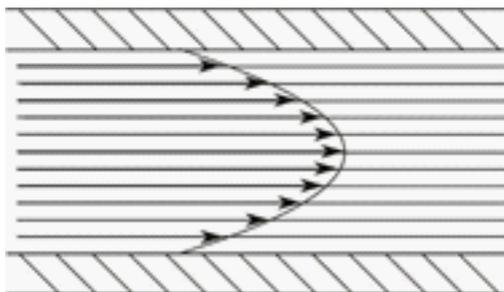


Рис. 2. Ламинарное течение жидкости в трубке.

Параметром, определяющим характер движения жидкости (ламинарное или турбулентное), является безразмерное число Рейнольдса. Это число приблизительно равно отношению кинетической энергии единицы объёма жидкости к величине работы силы вязкого трения. При течении жидкости в трубке можно оценить его как $Re = \rho ul / \eta$, где ρ — плотность жидкости, u — средняя (по сечению трубы) скорость потока, l — диаметр трубки. При движении шарика в жидкости для оценок Re можно заменить l на диаметр шарика.

При малой скорости, т. е. при малом числе Рейнольдса, течение любой жидкости будет ламинарным. Если скорость возрастает и достигает критического значения (соответствующее критическое значение числа $Re_{кр} \approx 1200$), то ламинарное течение сменяется турбулентным.

Обратим внимание на то, что число Рейнольдса зависит от отношения вязкости жидкости к её плотности. Это отношение играет существенную роль, так как кинетическая энергия жидкости пропорциональна плотности, а работа сил вязкости — коэффициенту вязкости. Поэтому относительное влияние сил вязкости определяется величиной $\nu = \eta / \rho$, которая называется кинематической вязкостью. В системе СИ размерностью кинематической вязкости является m^2/s . Число Рейнольдса можно записать в виде $Re = \frac{ul}{\nu}$.

Вязкость жидкости обусловлена силами **межмолекулярного взаимодействия**. Молекулы двух слоёв взаимно притягиваются, и движущий-

ся слой увлекает за собой соседний, который, в свою очередь, тормозится следующим, неподвижным слоем. Подтверждением такой природы сил вязкости является зависимость вязкости от температуры. С повышением температуры увеличиваются равновесные межмолекулярные расстояния, а взаимодействие между молекулами и, следовательно, вязкость жидкости уменьшаются. Например, для касторового масла при увеличении температуры с 18 до 40°C коэффициент вязкости уменьшается в четыре раза.

Температурная зависимость вязкости особенно заметна в аморфных телах, где изменение может достигать многих порядков, а граница между твёрдым и жидким состоянием условна. Сильно меняется вязкость машинных масел, что затрудняет пуск двигателя зимой. Без плавного, но значительного изменения вязкости стекла было бы невозможно стеклодувное производство.

Однако при рассмотрении газа межмолекулярным взаимодействием (существенным в жидкости) обычно пренебрегают (расстояния между молекулами велики), считая, что молекулы взаимодействуют только в момент столкновения. Частота столкновений определяется скоростью теплового движения, которая растёт с увеличением температуры. Поэтому и вязкость газа с увеличением температуры возрастает — в противоположность жидкости.

В предлагаемых лабораторных работах маленькие шарики падают в масле, и число Re составляет приблизительно 10^{-3} (ламинарное движение). В случае падения тех же шариков в воде $Re \approx 10^3$, и движение воды уже близко к турбулентному.

Единица динамической вязкости в системе СИ — Па·с. Часто для измерения вязкости используется единица пуаз (Пз). Ниже приведена связь между этими единицами:

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 1 \frac{1000 \text{ г}}{100 \text{ см} \cdot \text{с}} = 10 \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}} = 10 \text{ Пз} .$$

Лабораторная работа 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с введением по теме: «Движение вязкой жидкости».

Цель работы: определить коэффициент динамической вязкости масла при температуре окружающей среды.

Физическое обоснование эксперимента

На тело, движущееся в жидкости или газе, действует сила сопротивления среды, обусловленная силами внутреннего трения. При небольших скоростях движения и небольших размерах тела, т. е. при небольших значениях числа Рейнольдса — Re , сила сопротивления среды пропорциональна динамической вязкости η , скорости движения тела u и линейным размерам тела l .

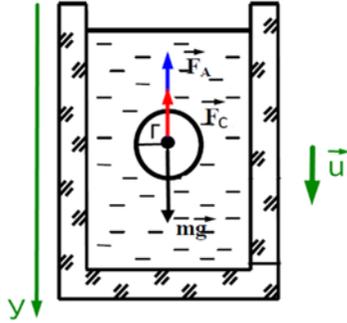
Согласно закону, установленному Стоксом, для шара, движущегося в жидкости:

$$F = 6\pi\eta ru, \quad (17.1)$$

где r — радиус шара.

Рассмотрим случай падения маленького шарика в жидкости под действием собственного веса. На шарик в этом случае действуют три силы:

- а) сила тяжести $P = mg = \rho_1 Vg = \rho_1 (4/3)\pi r^3 g$, где ρ_1 — плотность шарика, r — его радиус, g — ускорение свободного падения, V — объём шарика;
- б) сила Архимеда, направленная вертикально вверх и равная $F_A = \rho (4/3)\pi r^3 g$, где ρ — плотность жидкости;
- в) сила вязкого трения (Стокса) $F = 6\pi\eta ru$, направленная в сторону, противоположную направлению движения шарика.



Первые две силы постоянны, третья сила пропорциональна скорости u , поэтому сначала шарик движется ускоренно. По достижению шариком некоторой скорости u_0 выталкивающая сила и сила сопротивления в сумме уравновешивают силу тяжести, и, следовательно, дальше шарик движется без ускорения. В этом случае имеет место равенство $P - F_A = F$. Подставляя сюда выражения для всех трёх сил, получаем:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_1 - \rho) = 6\pi \eta r u_0. \quad (17.2)$$

Определив скорость как отношение пройденного пути l к времени t , заменив радиус r на диаметр d и решая уравнение относительно η , находим

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_1 - \rho}{u_0} = \frac{1}{18} g d^2 \frac{\rho_1 - \rho}{u_0}. \quad (17.3)$$

Формула (17.3) справедлива для случая движения шарика в безграничной жидкости. В реальном случае, когда шарик падает вдоль оси цилиндрического сосуда радиуса R , учёт влияния стенок сосуда приводит к изменению выражения для силы Стокса (так называемая поправка Ладенбурга),

$F = 6\pi \eta r u \left(1 + 2,4 \frac{r}{R} \right)$, и, как следствие, к выражению для коэффициента вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g(\rho_1 - \rho)}{l \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)} d^2 t, \quad (17.4)$$

где D — внутренний диаметр сосуда, который обычно много больше диаметра шарика.

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из стеклянного цилиндрического сосуда, в который налито исследуемое масло (рис 17.1). В масло бросают шарик. Для определения скорости падения шарика измеряется время, за которое шарик проходит расстояние между двумя нитями (1 и 2), закреплёнными горизонтально с внешней стороны цилиндра. В верхней части сосуда скорость шарика ещё не стабилизировалась, а в нижней части она может слегка изменяться из-за близости дна. При включении и выключении секундомера глаз наблюдателя следует располагать соответственно в плоскости верхней или нижней нити (для уменьшения ошибок на параллакс).

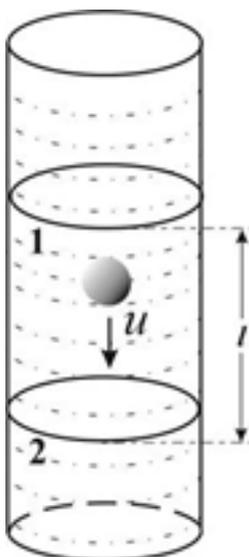


Рис. 17.1

Плотность исследуемого масла и радиус сосуда указаны на установке. Плотность материала шариков $\rho_1 = (2,72 \pm 0,01) \text{ г/см}^3$. Ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$ на широте Санкт-Петербурга.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Записать **температуру** в лаборатории и считать, что масло имеет ту же температуру. Повторно измерить температуру по завершению работы. Отобрать шарики, форма которых наиболее близка к сфере. Для этого их высы-

пают на плоское стекло и выбирают те, которые хорошо катаются по стеклу. Проверить и при необходимости подравнять нити на сосуде. Записать внутренний радиус сосуда R и плотность масла ρ .

1. При помощи микрометра измерить диаметр шарика.
2. Опустить шарик в сосуд (ближе к оси сосуда).
3. Измерить время прохождения шарика между нитями.
4. Повторить измерения не менее чем для 10 шариков, по возможности разных размеров.
5. Измерить расстояние l между нитями.

По ходу измерений рекомендуется строить черновой график зависимости времени t от диаметра шарика d (рис. 17.2) (начинать построение графика следует после трёх-четырёх опытов, когда станут примерно понятны типичные диаметры и времена). Это поможет:

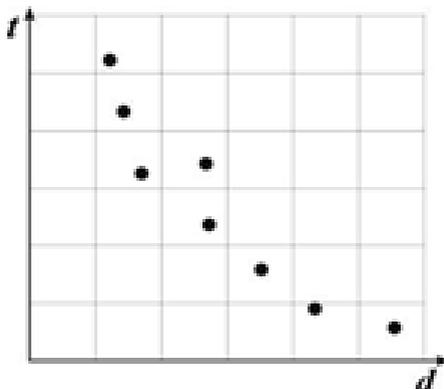


Рис. 17.2. Контроль качества результатов измерений: точки ложатся на плавную кривую $d^2t = \text{const}$.

- а) выявить промахи и грубые ошибки в ходе измерений: кривая $t(d)$ должна быть плавной и, как следует из (17.4), убывать примерно по закону $d^2t = \text{const}$, или $t = \text{const} / d^2$.

Самый частый промах — неправильное снятие показаний микрометра,

- б) оценить до начала расчётов разброс результатов относительно кривой и, возможно, исключить некоторые точки, сочтя их промахами.

Рассчитать коэффициент вязкости η_i (i — номер измерения) по результатам каждого измерения. Совокупность всех полученных результатов обработать по алгоритму прямых измерений. Результаты измерений и вычислений представить в виде таблицы.

Заметим, что для разных шариков меняется только значение $d^2 t$, тогда как выражение $\frac{1}{18} \cdot \frac{g(\rho_1 - \rho)}{l}$ можно вычислить один раз. Выражение $\left(1 + 2,4 \frac{d}{D}\right)$ мало отличается от 1, и если все шарики близки по диаметру, то можно вычислить его один раз для среднего по размеру шарика.

Анализ и расчёт погрешности

Погрешность в окончательный результат вносят:

- а) Погрешности величин, общих для всех опытов: D , ρ_1 , ρ_2 , g , l .
- б) Погрешности измерения d (микрометром) и t (секундомером).
- в) Разброс значений η , полученных для нескольких шариков. Сюда неявно входят многие факторы: несферичность шариков, загрязнённость шариков и масла, удаление от центра сосуда, ошибки снятия показаний приборов.

Рассчитать доверительные границы случайной погрешности $\Delta\eta$ по алгоритму прямых измерений.

Рассчитать систематическую погрешность. Перед расчётом имеет смысл сравнить погрешности всех величин и отбросить заведомо несущественные, чтобы избежать бессмысленных выкладок и снизить вероятность арифметических ошибок. Погрешности D , ρ_1 , ρ_2 и g относительно невелики, и обычно их можно не учитывать (этот вывод следует проверить). Относительная погрешность d обычно больше, а самая большая относительная погрешность — у величины l .

После этого рассчитать окончательную погрешность:

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\Delta\eta_{\text{прибор.}}\right)^2 + \left(\Delta\eta_{\text{случ.}}\right)^2}.$$

Содержание отчёта

1. График зависимости времени падения шарика от его диаметра.
2. Таблица данных измерений и вычислений вязкости для каждого шарика.
3. Расчёт среднего значения вязкости жидкости и его доверительной границы по алгоритму прямых измерений.
4. Анализ источников погрешностей, выбор тех из них, которые необходимо учесть, и расчёт систематической погрешности.

5. Расчёт окончательного значения погрешности.
6. Записать окончательный результат с погрешностью в системе СИ.
(Указать температуру, которой соответствует полученный результат).

Контрольные вопросы

- ? Что такое ламинарное и турбулентное движение жидкости?
- ? В чём физический смысл числа Рейнольдса?
- ? Как зависит коэффициента внутреннего трения от температуры?
- ? Какова природа сил внутреннего трения в жидкости?
- ? Какие силы действуют на шарик в процессе падения?
- ? Какой метод определения динамического коэффициента внутреннего трения использован в данной работе.

Тема: ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Введение

Поверхностное натяжение жидкости — это важная характеристика границы раздела между жидкостью и воздухом, находящимся с ней в контакте. С поверхностным натяжением связаны такие явления как образование капель, смачивание, капиллярные явления. Существуют различные методы измерения поверхностного натяжения: метод счёта капель, метод поднятия жидкости в капилляре, метод максимального давления пузырька, метод стоячих волн, метод отрыва кольца и другие.

Особенности жидкого состояния вещества. В жидком состоянии молекулы вещества расположены близко друг к другу, как и в твёрдом состоянии. Поэтому объём жидкости мало зависит от давления. Постоянство занимаемого объёма является свойством общим для жидких и твёрдых тел и отличающим их от газов, способных занимать любой предоставленный им объём.

Возможность свободного перемещения молекул относительно друг друга обуславливает свойство текучести жидкости. Тело в жидком состоянии, как и в газообразном, не имеет постоянной формы. Форма жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил и сил поверхностного натяжения. Большая свобода движения молекул в жидкости приводит к большей скорости диффузии в жидкостях по сравнению с твёрдыми телами, обеспечивает возможность растворения твёрдых веществ в жидкостях.

Поверхностный слой жидкости. Рассмотрим сосуд с жидкостью. Если мысленно выделить внутри жидкости какую-либо молекулу M_1 и описать вокруг неё сферу действия межмолекулярных сил, то внутри этой сферы окажутся центры большого числа молекул, так как расстояния между молекулами жидкости малы. В силу хаотичного распределения молекул равнодействующая молекулярных сил, приложенных к молекуле M_1 , в среднем будет равна нулю.

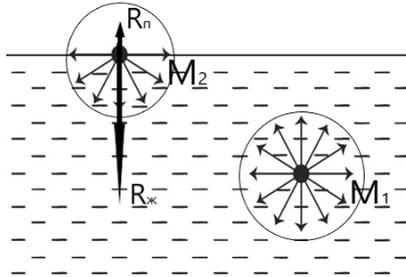


Рис. 1. Силы взаимодействия между молекулами на поверхности и внутри жидкости.

В случае, если молекула M_2 расположена на поверхности жидкости, в нижней части сферы молекулярного действия будет находиться жидкость, а в верхней — пар этой жидкости и воздух. Следовательно, число молекул в нижней полусфере будет во много раз больше, чем в верхней. Это означает, что приложенная к молекуле M_2 равнодействующая $R_{ж}$, которая создаётся действием молекул нижней полусферы, будет велика по сравнению с равнодействующей $R_{п}$, созданной молекулами верхней полусферы. Вообще говоря, равнодействующая $R_{п}$ настолько мала, что ею можно пренебречь.

Так как всё изложенное применимо ко всем молекулам, находящимся на свободной поверхности жидкости, то ясно, что молекулы поверхностного слоя должны втягиваться внутрь жидкости. В силу этого поверхностный слой (равный радиусу молекулярного действия $r \approx 10^{-9}$ м) должен создавать давление на жидкость, которое называется **молекулярным давлением**. Сила молекулярного давления всегда направлена внутрь жидкости, т. е. сжимает её.

Молекулярное давление не действует на тела, находящиеся внутри жидкости. Вычислить величину этого давления возможно теоретически. Оказывается, это давление очень велико. Например, для воды его величина составляет около $11 \cdot 10^8$ Н/м².

Большая величина молекулярного давления обуславливает малую сжимаемость жидкости. Отметим, хотя при наличии внешнего давления объём жидкости уменьшается, это давление так мало, что им можно пренебречь. Для того чтобы объём жидкости заметно изменился, внешнее давление на неё должно быть по порядку величины сравнимым с молекулярным давлением. Поскольку такое давление на жидкость создать трудно, то можно считать жидкости несжимаемыми.

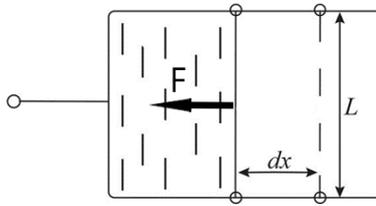


Рис. 2. Проволочная рамка с подвижной перекладиной, затянутая мыльной плёнкой.

Энергия поверхностного слоя жидкости. Коэффициент поверхностного натяжения. Согнём проволоку в виде буквы П и укрепим на ней подвижную поперечину L (рис.2.). Если затянуть образовавшуюся рамку мыльной плёнкой, то подвижная поперечина начнёт перемещаться. Следовательно, на неё действует сила F , направленная вдоль поверхности жидкости, способствующая сокращению этой поверхности. Это означает, что поверхностный слой жидкости обладает избыточной поверхностной энергией, за счёт которой он может совершать работу при сокращении площади свободной поверхности. Наличие избыточной энергии у поверхностного слоя жидкости объясняется тем, что молекулы втягиваются с поверхности внутрь жидкости. Для того чтобы увеличить площадь свободной поверхности жидкости, нужно часть молекул, находящихся внутри жидкости, переместить на её поверхность, а для этого нужно совершить работу против молекулярных сил, втягивающих эти молекулы внутрь жидкости, т. е. увеличить энергию её поверхностного слоя. Наоборот, при сокращении поверхностного слоя молекулярные силы совершают работу за счёт уменьшения поверхностной энергии жидкости.

Таким образом, величина избыточной поверхностной энергии жидкости ΔE_n , освобождающейся при уменьшении этой поверхности на ΔS , должна быть прямо пропорциональна ΔS :

$$\Delta E_n = \sigma \Delta S . \quad (1)$$

Поскольку работа A , выполненная молекулярными силами при уменьшении площади свободной поверхности жидкости на ΔS равна ΔE_n , соотношение (1) можно записать и так:

$$A = \sigma \Delta S . \quad (2)$$

Работа молекулярных сил, очевидно, должна зависеть от рода жидкости и от внешних условий, в которых находится поверхность жидкости. Эта зависимость и выражается коэффициентом пропорциональности σ .

Величина σ , характеризующая зависимость свободной поверхностной

энергии жидкости от рода жидкости и внешних условий, в которых она находится, называется **коэффициентом поверхностного натяжения**.

Коэффициент поверхностного натяжения измеряется работой, совершаемой молекулярными силами при уменьшении площади свободной поверхности жидкости на единицу:

$$\sigma = A / \Delta S . \quad (2a)$$

В системе СИ за единицу измерения σ принимается такой коэффициент поверхностного натяжения, при котором молекулярные силы совершают работу в 1 Дж, уменьшая площадь свободной поверхности жидкости на 1 м²: размерность $[\sigma] = 1 \text{ Дж/м}^2$.

Поверхностное натяжение. Работа, совершаемая силой F при перемещении поперечины L на расстояние Δx (рис.2.), определяется формулой (2). Поскольку мыльная плёнка имеет две свободные поверхности, между которыми находится жидкость, у плёнки имеются и две линии соприкосновения с поперечиной L . Уменьшение площади свободной поверхности жидкости с одной стороны плёнки при перемещении поперечины L на расстояние Δx равно $\Delta x L$. Следовательно, полное уменьшение площади плёнки ΔS , входящее в формулу (2) будет $2\Delta x L$. Так как работа силы F на пути Δx в данном случае равна $2F\Delta x$, из формулы (2) имеем: $2F\Delta x = \sigma \cdot 2\Delta x L$. Или

$$F = \sigma L . \quad (3)$$

Сила, которая вызывает сокращение площади свободной поверхности жидкости, действует в касательной к этой поверхности плоскости и обусловлена взаимодействием молекул жидкости, называется **силой поверхностного натяжения**.

Сила поверхностного натяжения действует на любую замкнутую линию, выделенную на поверхности жидкости всегда по нормали к этой линии. Это означает, что поверхностный слой жидкости всегда находится в состоянии натяжения.

Из формулы (3) видно, что сила поверхностного натяжения пропорциональна длине замкнутого контура, ограничивающего какую-либо часть свободной поверхности. Если на этом контуре выделить отрезок L , то на него также будет действовать сила поверхностного натяжения, определяемая формулой (3), примером чего может служить сила, действующая на поперечину L (Рис.2.). Из этого следует, что

$$\sigma = F / L , \quad (3a)$$

т. е. коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины линии, ограничивающей какую-либо часть свободной поверхности жидкости. Значит, в качестве единицы измерения σ можно брать и 1 Н/м.

В отличие от упругих сил, силы поверхностного натяжения никак не изменяются по мере сокращения площади поверхности плёнки, так как плотность жидкости, а, следовательно, и среднее расстояние между молекулами на поверхности, не меняется.

Поверхностное натяжение зависит от свойств самой жидкости, её температуры, свойств среды, с которой граничит жидкость, а также от примесей. Вещества, снижающие поверхностное натяжение жидкости, называются поверхностно-активными веществами (ПАВ). Изменение поверхностного натяжения происходит благодаря адсорбции молекул ПАВ (повышения их концентрации в поверхностном слое по сравнению с его концентрацией в объёме раствора) и уменьшении свободной поверхностной энергии. По отношению к воде поверхностно-активными являются многие органические соединения, например, жирные кислоты и их соли, спирты, амины.

Общее количество вещества, которое вообще может закрепиться (адсорбироваться) на поверхности жидкости, очень мало, но даже ничтожные примеси ПАВ, скапливаясь на поверхности жидкости, могут существенно изменить её поверхностное натяжение. Так, небольшие добавки мыла могут уменьшить поверхностное натяжение воды более чем в 3 раза.

Минимальное поверхностное натяжение имеет жидкий гелий на границе со своим паром — 3,5 мН/м (вблизи абсолютного нуля). У большинства веществ поверхностное натяжение колеблется от 10 до 2000 мН/м.

Значения коэффициента поверхностного натяжения σ (в Н/м) для некоторых жидкостей при температуре 20°C (второй фазой является воздух) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты поверхностного натяжения

Жидкость	Вода	Молоко	Спирт этиловый	Эфир этиловый	Ртуть
σ , Н/м	0,072	0,048	0,022	0,017	0,465

При повышении температуры вещества увеличивается среднее расстояние между его молекулами, и, следовательно, силы молекулярного сцепления уменьшаются. Это означает, что коэффициент поверхностного натяжения должен зависеть ещё и от температуры. Опыт показывает, что коэффициент поверхностного натяжения монотонно уменьшается с повышением температуры жидкости, обращаясь в ноль в критической точке (для воды это температура 374°C, и давление 218 атмосфер). В критической точке жидкая и газообразная фазы становятся тождественными, поверхность раздела между ними перестаёт существовать и коэффициент поверхностного натяжения должен обратиться в ноль.

Значения коэффициента поверхностного натяжения σ (в Н/м) для воды и спирта при различных температурах приведены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость σ от температуры.

Температура, °C	σ , Н/м	
	Вода	Этиловый спирт
0	0,0756	0,0249
30	0,0712	0,0219
60	0,0662	0,0192
90	0,0608	0,0164
120	0,0549	0,0134
150	0,0486	0,0101
180	0,0423	0,0067
210	0,0354	0,0033
240	0,0286	0,0001
243	–	0
300	0,0144	–
370	0,0005	–
374	0	–

Условием устойчивого равновесия жидкостей является минимум свободной поверхностной энергии, т. е. совместное действие сил молекулярного давления и поверхностного натяжения должно придавать жидкости такую форму, при которой свободная поверхность имеющейся массы жидкости будет наименьшей. В отсутствии внешних сил (что было подтверждено в условиях невесомости) жидкость принимает сферическую форму.

Смачивание. Краевой угол. Если из воды вынуть стеклянную палочку, то на палочке останутся капли воды. Такое явление называется смачиванием. Это значит, что при удалении палочки из воды отрывается не вода от стекла, а вода от воды. Следовательно, молекулы воды сцеплены друг с другом слабее, чем с молекулами стекла. Если молекулы жидкости взаимодействуют друг с другом слабее, чем с молекулами твёрдого вещества, то жидкость называется смачивающей по отношению к этому веществу. Однако жидкость, смачивающая одни вещества, может не смачивать другие. Опыт показывает, что вода смачивает стекло и не смачивает парафин или поверхность, покрытую слоем жира.

Если вынуть стеклянную палочку из ртути, то на палочке капля ртути не окажется. Если молекулы жидкости взаимодействуют друг с другом

сильнее, чем с молекулами твёрдого вещества, то жидкость называется несмачивающей по отношению к этому веществу.

Если граничат друг с другом вещества в трёх различных агрегатных состояниях — твёрдое, жидкое и газообразное, то вся система принимает конфигурацию, соответствующую минимуму энергии (поверхностной, в поле сил тяжести и т. п.). Капля жидкости на поверхности твёрдого тела может принимать различную форму. Отсчитываемый внутри жидкости угол между касательными: к поверхности твёрдого тела и к поверхности жидкости, — называется *краевым углом*. Если угол острый, то говорят, что жидкость смачивает вещество твёрдого тела, если тупой — не смачивает. Если угол равен нулю, имеет место полное смачивание. В этом случае жидкость неограниченно растекается по поверхности твёрдого тела. Если краевой угол равен π , имеет место полное несмачивание. В этом случае поверхность, по которой жидкость граничит с твёрдым телом, стягивается в точку, жидкость отделяется от твёрдой поверхности.

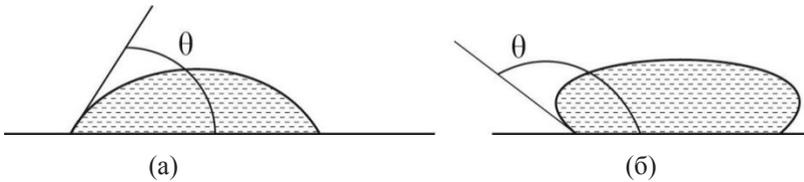


Рис. 3. Краевой угол, острый для смачивающей жидкости (а), и тупой для несмачивающей (б).

Мениск. Давление, создаваемое искривлённой поверхностью жидкости. Если жидкость находится в широком сосуде, её свободная поверхность искривляется только у самой стенки этого сосуда. Но если поместить жидкость в достаточно узкий сосуд, то искривляется уже вся свободная поверхность жидкости. Такая искривлённая поверхность сферической формы называется *мениском*. У смачивающей жидкости мениск получается вогнутым (рис. 4 б), а у несмачивающей — выпуклым (рис. 4 в).

Когда поверхность раздела двух фаз не плоская, то по обе стороны искривлённой поверхности существует разность давлений, вызванная поверхностным натяжением. Такое добавочное давление называется поверхностным или капиллярным Δp . Величина этого давления зависит от кривизны поверхности и определяется формулой Лапласа:

$$\Delta p = \sigma [1/R_1 + 1/R_2], \quad (4)$$

где R_1 и R_2 — главные радиусы кривизны поверхности.

Если поверхность плоская, т. е. $R_1 = R_2 = \infty$, то $\Delta p = 0$.

Если поверхность сферическая, т. е. $R_1 = R$, $R_2 = R$, то $\Delta p = 2\sigma/R$.
 Если поверхность цилиндрическая, т. е. $R_1 = R$, $R_2 = \infty$, то $\Delta p = \sigma/R$.

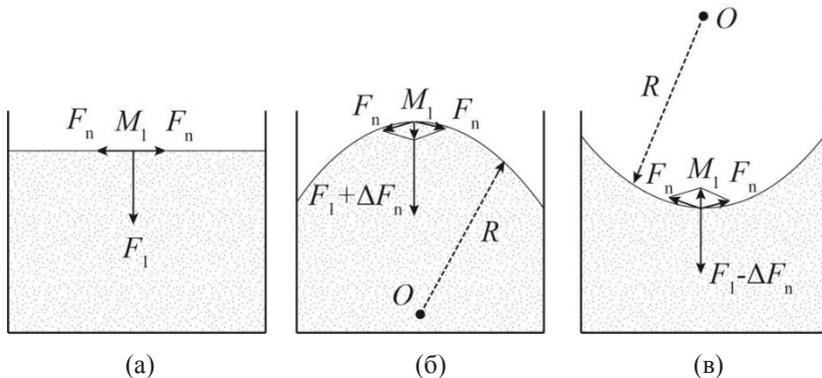


Рис. 4. Силы, создающие молекулярное давление под плоской (а), выпуклой (б) и вогнутой (в) поверхностями.

Для плоской поверхности (рис. 4 а) силы поверхностного натяжения не создают дополнительного давления: давление внутри жидкости равно внешнему давлению. Для выпуклой поверхности (рис. 4 б, например, капля жидкости в воздухе): давление внутри жидкости больше давления окружающего воздуха. Для вогнутой поверхности (рис. 4 в, например, пузырёк газа в жидкости): давление внутри жидкости меньше, чем внутри газового пузырька.

Капиллярные явления. Особенности взаимодействия жидкостей со смачиваемыми и несмачиваемыми поверхностями твёрдых тел являются причиной капиллярных явлений.

Капилляром называется трубка с малым внутренним диаметром. Если стеклянную капиллярную трубку погрузить одним концом в воду, то внутри капилляра уровень воды оказывается выше уровня открытой поверхности воды. Если стеклянную капиллярную трубку погрузить одним концом в ртуть, то уровень ртути в капилляре будет ниже уровня открытой поверхности ртути.

В капиллярах радиуса r уровень смачивающей (несмачивающей) жидкости выше (ниже), чем в сообщающемся с ними широком сосуде, на величину

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} \cos \theta, \quad (5)$$

где ρ — плотность жидкости, g — ускорение силы тяжести, θ — краевой угол.

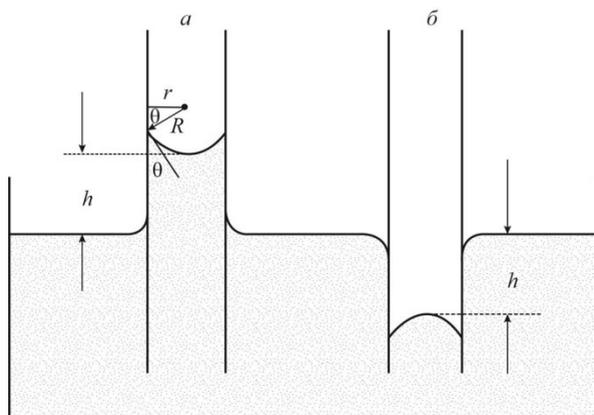


Рис. 5. Подъём уровня жидкости в капилляре при смачивании (а) и опускание уровня жидкости в капилляре при несмачивании (б).

Лабораторная работа 18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с введением по теме: «Поверхностное натяжение жидкости».

Цель работы: определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца и исследовать его зависимость от концентрации растворённых веществ и температуры.

Приборы и материалы

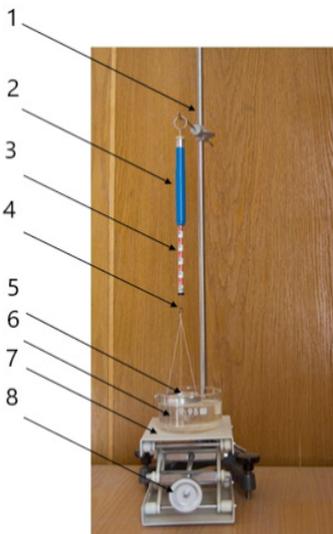


Рис. 18.6. Фотография установки для определения коэффициента поверхностного натяжения.

Установка для определения величины коэффициента поверхностного натяжения изображена на рис. 18.6. Динамометр (2) со шкалой в мН (3), подвешенный на вертикальном металлическом штативе (1). К динамометру прикрепляется металлическая дужка (4), на которую на нитях подвешивается металлическое тонкостенное кольцо (5), изготовленное из материала, хорошо смачиваемого исследуемой жидкостью. Под этим кольцом находится поднимающийся и опускающийся столик (7), высота которого регулируется винтом (8). На столик ставится стеклянная ёмкость с исследуемой жидкостью (6). Для исследования коэффициента поверхностного натяжения при различных температурах на столик стеклянная ёмкость заменяется на стеклянный стакан с широким горлом, а к штативу крепится спиртовой термометр.

В работе используется штангенциркуль для измерения диаметра кольца, снабжённый нониусом (точность измерения 0,05 мм).

В качестве исследуемой жидкости используется вода и различные растворы (на усмотрение преподавателя готовятся растворы заданной концентрации спирта, сахара, соли, моющих средств и др.)

Физическое обоснование эксперимента и техника измерений

Когда кольцо не опущено в жидкость, сила тяжести кольца и всей системы, подвешенной к пружине, уравновешивается силой упругости пружины. Растяжение пружины в этом случае примем за начальное и далее не будем учитывать вес системы и равную ему силу упругости.

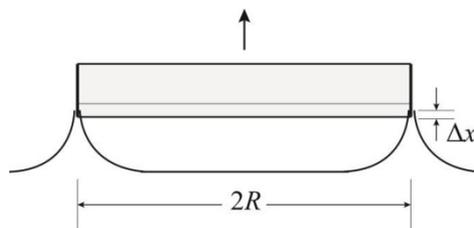


Рис. 18.7. Вертикальное сечение кольца, касающегося воды.

Опустим висящее на пружине кольцо в кювету с жидкостью так, чтобы кольцо слегка коснулось поверхности воды. Начнём медленно поднимать кольцо (направление движения кольца обозначено стрелкой на рис. 18.7). При этом на него со стороны жидкости действуют силы поверхностного натяжения, приложенные к границе поверхности жидкости и кольца. На рис. 7 показано вертикальное сечение кольца, касающегося воды. Поверхность жидкости возле стенок кольца искривляется, так как жидкость смачивает

кольцо. На рисунке показан случай, когда имеется полное смачивание, и поэтому силы поверхностного натяжения направлены вдоль стенок кольца вертикально вниз.

По мере поднятия кольца пружина будет постепенно растягиваться, а сила упругости $F_{упр}$ пружины увеличиваться. В момент, когда $F_{упр}$ станет равна силе поверхностного натяжения F (суммарная сила по всей границе жидкости с кольцом), кольцо оторвётся от поверхности жидкости.

Для нахождения коэффициента поверхностного натяжения используется формула (3а): $\sigma = F / L$.

Граница поверхности жидкости проходит по внешней и внутренней окружности кольца. Поскольку кольцо настолько тонкое, что его толщину можно не учитывать, длина границы равна $L = 2\pi D$, где D — диаметр. Тогда окончательно получаем рабочую формулу:

$$\sigma = F / (2\pi D) . \quad (18.1)$$

При точных измерениях вводят поправочные коэффициенты, поскольку сила отрыва зависит не только от формы предмета, но и от объёма жидкости, оставшейся на нём после отрыва, поверхностного натяжения, плотности жидкости и окружающего газа (пара).

В этой работе Вам необходимо измерить коэффициенты поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца, а также исследовать их зависимость от концентрации растворённых веществ и температуры. Для этого Вам нужно выполнить следующие задания:

1. измерить коэффициент поверхностного натяжения воды;
2. изучить зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры для воды. Измерения следует начинать, когда температура воды будет $T \approx 80^\circ\text{C}$ с интервалом в 5°C .
3. измерить коэффициент поверхностного натяжения водных растворов.

Порядок выполнения лабораторной работы

В ходе выполнения работы следует учитывать, что прикосновение пальцев к поверхности стекла или металла сильно ухудшает смачиваемость этих поверхностей. Перед проведением опытов края кольца должны быть тщательно вытерты для удаления следов воды.

Задание 1:

1. Измерить внутренний/внешний диаметр кольца штангенциркулем 5 раз. Запишите результаты измерений.
2. Наполнить ёмкость исследуемой жидкостью и поставить на лабораторный столик.

3. Столик, на котором стоит ёмкость с жидкостью, поднять с помощью винта (8) (рис. 18.6) на такую высоту, чтобы нижний край металлического кольца погрузился в жидкость примерно на 5 мм. При этом стенки металлического кольца смачиваются водой.
4. Запишите показания динамометра F_1 в таблицу.
5. Столик с чашкой начать медленно опускать, вращая винт (8). Наблюдая за показаниями динамометра, определить по динамометру положение шкалы в момент отрыва кольца от поверхности воды F_2 .
6. Результат измерения занести в таблицу.
7. Рассчитайте разницу между двумя показаниями динамометра F (пп. 4 и 6).
8. Повторить пп. 3 – 7 ещё 4 раза.

F_1 , Н	F_2 , Н	F , Н	σ , Н/м

Задание 2:

1. Налейте в стакан горячую воду (Воду следует наливать постепенно, чтобы избежать повреждения стенок стакана из-за резкого перепада температуры).
2. Поставьте стакан на столик.
3. Опустите в стакан термометр.
4. Измерьте температуру воды. Запишите полученное значение в таблицу.
5. Повторите пп. 3–7 Задания 1 для определения величины коэффициента поверхностного натяжения для конкретной температуры (минимум 6 значений).

T , °С	F_1 , Н	F_2 , Н	F , Н	σ , Н/м

Задание 3:

1. Приготовьте водные растворы одного и того же вещества разной концентрации.
2. Повторите пп. 3 – 7 Задания 1 для определения величины коэффициента поверхностного натяжения для конкретной концентрации.

Обработка результатов измерений

1. Используя расчётную формулу (18.1), вычислите значения коэффициента поверхностного натяжения для отдельных измерений. За величину F необходимо брать разницу между двумя показаниями динамометра.
2. Вычислите средние значения σ . Оцените абсолютные погрешности $\Delta\sigma$. Результаты всех расчётов занесите в таблицу.
3. Оцените достоверность полученных значений, сопоставив их со справочными данными (см. приложение 1, таблица 4).
4. Постройте график зависимости σ , полученного экспериментально, от температуры воды. На этот же график нанесите табличные значения (см. приложение 1, таблица 5). Сравните полученные зависимости.
5. Постройте график зависимости σ , полученного экспериментально, от концентрации раствора. Сделайте выводы о полученной зависимости.

Содержание отчёта

1. Название, номер лабораторной работы, дата выполнения, автор отчёта.
2. Схема установки.
3. Параметры и характеристики используемых приборов.
4. Рабочие формулы для выполнения расчётов.
5. Таблица с результатами измерений и вычислений.
6. Графики зависимостей коэффициента поверхностного натяжения σ от температуры, и от концентрации раствора.
7. Вычисление погрешностей измерений.
8. Окончательные результаты.
9. Сопоставление полученных величин со справочными значениями.
10. Предложите объяснение возможных отличий полученных Вами данных от приведённых справочных значений.
11. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- ? В чем заключается явление поверхностного натяжения?
- ? Как явление поверхностного натяжения объясняется с молекулярной точки зрения?
- ? Приведите определения коэффициента поверхностного натяжения с силовой и энергетической точек зрения.
- ? От чего зависит поверхностное натяжение?
- ? Чем обусловлено существование сил поверхностного натяжения?

Приложение 1

Таблица 3. Значения коэффициента поверхностного натяжения веществ и водных растворов $\sigma \cdot 10^{-3}$ Н/м в зависимости от температуры.

Вещество	Температура		
	0°C	20°C	40°C
Вода	75,6	73,0	69,6
Натрий хлористый, 20% раствор	82,6	79,8	76,6
Этиловый спирт, 100%	24	22,3	20,6
Этиловый спирт, 80%	26	25	23
Этиловый спирт, 60%	28	27	25
Этиловый спирт, 40%	32	30	28
Этиловый спирт, 20%	40	38	36

Таблица 4. Значения коэффициента поверхностного натяжения воды $\sigma \cdot 10^{-3}$ Н/м в зависимости от температуры.

Температура, °C	$\sigma \cdot 10^{-3}$ Н/м
0	75,60
5	74,90
10	74,22
15	73,49
20	73,05
25	72,75
30	71,18
40	69,56
50	67,91
60	66,18
70	64,40
80	62,60
100	58,90

Лабораторная работа 19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КАПИЛЛЯРА И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с введением по теме: «Поверхностное натяжение жидкости».

Цель работы: определить внутренний радиус стеклянного капилляра, найти коэффициент поверхностного натяжения различных жидкостей и исследовать его зависимость от концентрации растворенных веществ и температуры.

Приборы и материалы

- Стеклянные капилляры
- Мерный стакан
- Термометр
- Весы
- Вода
- Различные вещества для приготовления растворов (спирт, сахар, соль... На усмотрение преподавателя)

Физическое обоснование эксперимента и техника измерений

Поскольку внутренний диаметр капилляра очень мал, при выполнении данной работы будем считать, что мы имеем дело с полным смачиванием жидкостью поверхности твёрдого тела. Для такой системы силу поверхностного натяжения можно считать направленной вдоль поверхности твёрдого тела перпендикулярно к границе соприкосновения твёрдого тела и жидкости. В этом случае подъём жидкости вдоль смачиваемой поверхности продолжается до тех пор, пока сила тяжести $F_T = mg = \rho h \pi r^2 g$, действующая на столб жидкости в капилляре и направленная вниз, не станет равной по модулю силе поверхностного натяжения F (см. формулу 3), действующей

вдоль границы соприкосновения жидкости с поверхностью капилляра.

Следовательно, высота подъёма столба жидкости в капилляре обратно пропорциональна радиусу капилляра. Формулу (5) можно записать следующим образом:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} . \quad (19.1)$$

При проведении точных измерений краевой угол необходимо учитывать!

В этой работе Вам необходимо определить внутренний радиус стеклянного капилляра и найти коэффициенты поверхностного натяжения различных жидкостей, а также исследовать их зависимость от концентрации растворённых веществ и температуры. Для этого Вам нужно выполнить следующие задания:

- определить радиус капилляра (капилляров);
- измерить коэффициент поверхностного натяжения водных растворов;
- изучить зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры для воды. Измерения следует начинать, когда температура воды будет $T \approx 80^\circ\text{C}$ с интервалом в 5°C .

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Заполнить ёмкость водой и опустить в неё капилляр.
2. Измерить h — высоту подъёма жидкости в капилляре. Запишите результаты измерений.
3. Из формулы (19.1) определить радиус капилляра. Значение коэффициента поверхностного натяжения для воды принять равным $\sigma = 0,07$ Н/м.
4. Приготовить водные растворы заданной концентрации различных веществ (на усмотрение преподавателя).
5. Измерить высоту подъёма жидкостей. Результаты измерений занести в таблицу:

Вещество	Концентрация, г/мл	h , мм	σ , Н/м

1. Налить в стакан горячую воду (воду следует наливать постепенно, чтобы избежать повреждения стенок стакана из-за резкого перепада температуры).
2. Опустить в воду капилляр. Измерить температуру воды. Определить

высоту подъёма жидкости в капилляре.

3. Прodelать аналогичные измерения (пункт 7) несколько раз по мере остывания воды. Результаты занести в таблицу:

Температура, °С	h , мм	σ , Н/м

Обработка результатов измерений

1. Зная радиус стеклянного капилляра по измерениям с водой, определить коэффициенты поверхностного натяжения других жидкостей в зависимости от концентрации.
2. Постройте график зависимости σ , полученного экспериментально, от концентрации раствора. Сделайте выводы о полученной зависимости (на усмотрение преподавателя).
3. Постройте график зависимости σ , полученного экспериментально, от температуры воды. Проанализируйте полученную зависимость.

Содержание отчёта

1. Название, номер лабораторной работы, дата выполнения, автор отчёта.
2. Параметры и характеристики используемых приборов.
3. Рабочие формулы для выполнения расчётов.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей коэффициента поверхностного натяжения σ от температуры, σ от концентрации раствора (на усмотрение преподавателя).
6. Вычисление погрешностей измерений.
7. Окончательные результаты.
8. Сопоставление полученных величин со справочными значениями.
9. Предложите объяснение возможных отличий, полученных Вами данных, от приведённых справочных значений.
10. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- ? В чём заключается явление поверхностного натяжения?
- ? Как явление поверхностного натяжения объясняется с молекулярной точки зрения?
- ? Назовите единицы измерения коэффициента поверхностного

натяжения.

- ? Приведите определения коэффициента поверхностного натяжения с силовой и энергетической точек зрения.
- ? От чего зависит поверхностное натяжение?
- ? Приведите примеры капиллярных явлений, с которыми Вы сталкиваетесь.
- ? Чем обусловлено существование сил поверхностного натяжения?

Тема: ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Введение

Как известно, все тела при нагревании расширяются. Чтобы объяснить природу теплового расширения твёрдых тел, надо рассмотреть зависимость энергии взаимодействия частиц от расстояния между ними.

Если бы частицы были совершенно неподвижны, т. е. если бы их кинетическая энергия равнялась нулю, то они находились бы друг от друга на расстоянии r_0 , соответствующем дну потенциальной ямы (рис. 1). Но частицы в узлах кристаллической решётки тела не находятся в состоянии покоя, а участвуют в тепловом колебательном движении около положения равновесия. Рассмотрим колебания частицы 2 в системе координат, связанной с частицей 1. Характер колебаний будет определяться формой потенциальной кривой, изображенной на рис. 1.

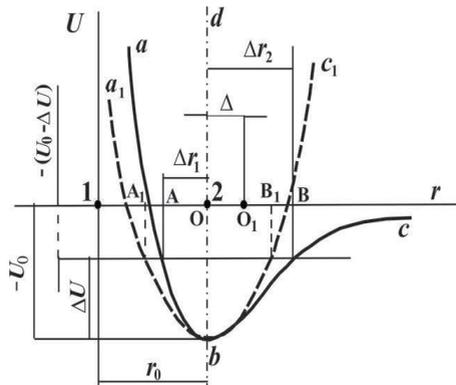


Рис. 1. Зависимость энергии взаимодействия частиц от расстояния между ними — кривая abc . Парабола a_1bc_1 , показанная пунктиром, приведена для сравнения — гипотетический случай одинаковой зависимости от расстояния сил отталкивания и притяжения.

При повышении температуры увеличивается полная энергия частицы, и соответственно возрастает амплитуда колебаний. В момент прохождения

частицей положения равновесия её кинетическая энергия принимает максимальное значение. Пусть это значение равно W . Потенциальная энергия частицы в этот момент равна $-U_0$ (рис.1). За нулевое значение потенциальной энергии частицы примем энергию при бесконечно большом расстоянии между частицами ($r \rightarrow \infty$).

При движении частицы 2 в сторону сближения с частицей 1 энергия расходуется на преодоление сил отталкивания и переходит в потенциальную энергию взаимодействия. Потенциальная энергия увеличивается на величину $\Delta U = W$ и становится равной ($U_0 - \Delta U$). При этом частица смещается относительно положения равновесия на расстояние Δr_1 . При движении частицы 2 в другую сторону её кинетическая энергия будет расходоваться на преодоление сил притяжения и также превращаться в потенциальную. При этом оказывается, что частица 2 смещается вправо на расстояние Δr_2 , большее, чем Δr_1 , как видно из рис. 1. Таким образом, колебания частиц в решётке являются ангармоничными. Эта ангармоничность связана с асимметрией потенциальной кривой относительно прямой bd (её левая ветвь ab идёт значительно круче, чем правая ветвь bc). В свою очередь, асимметрия потенциальной кривой связана с тем, что силы притяжения и отталкивания порозному зависят от расстояния между частицами.

Если бы частица 2 совершала чисто гармонические колебания, изменение её потенциальной энергии описывалось бы при этом параболой a_1bc_1 , и отклонения от положения равновесия OA_1 и OB_1 были бы равны. В этом случае нагревание не могло бы вызвать расширения тела, так как с увеличением температуры возрастала бы только амплитуда колебаний, а средние положения частиц оставались бы неизменными.

В реальном случае в результате асимметрии потенциальной кривой среднее положение частицы при $T > 0$ К (точка O_1 на рис. 1) уже не совпадает с положением равновесия O , а смещена вправо на расстояние $\Delta = (\Delta r_2 - \Delta r_1)$. Это означает увеличение среднего расстояния между частицами на величину Δ . Чем выше температура, тем величина Δ больше, и, следовательно, тело будет расширяться.

Количественно тепловое расширение твёрдых тел характеризуется коэффициентом линейного расширения α , определяемым соотношением

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \left(\frac{dl}{dT} \right), \quad (1)$$

где l_0 — длина тела при начальной температуре. Коэффициент линейного расширения характеризует относительное изменение длины твёрдых тел при изменении их температуры на один градус.

Коэффициент линейного расширения можно оценить в рамках простейшей модели. Разложим потенциальную энергию $U(r)$ при малом смещении от положения равновесия ($\Delta r = r - r_0$) в ряд с точностью до величин третьего порядка малости.

$$U(r) = U(r_0) + c(\Delta r)^2 / 2 - g(\Delta r)^3 / 3.$$

Сила, действующая на частицу 2 при её движении вблизи положения равновесия вдоль оси r будет:

$$F = -dU / dr = -c\Delta r + g(\Delta r)^2.$$

В первом приближении сила равна $c \Delta r$. Это квазиупругая сила, под действием которой тело совершает гармонические колебания. Здесь c — коэффициент жёсткости. Добавление второго члена позволяет рассмотреть явления, принципиально невозможные в гармоническом приближении, например, тепловое расширение. Коэффициент g принято называть **коэффициентом ангармоничности**.

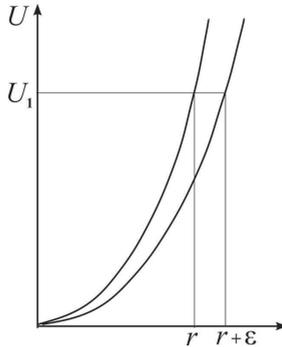


Рис. 2. Смещение точек поворота.

Сравним положение точек поворота для гармонических и ангармонических колебаний при одной и той же энергии U_1 (рис. 2). Координаты точек поворота, соответственно, r и $r + \epsilon$, где ϵ мало. Поскольку $U_1(r + \epsilon) = U_1(r)$, то

$$\frac{1}{2}c(r + \epsilon)^2 - \frac{1}{3}g(r + \epsilon)^3 = \frac{1}{2}cr^2.$$

Раскрыв скобки и отбросив слагаемые, содержащие ε^2 и ε^3 (если величина ε мала, то более высокими её степенями можно пренебречь), получим:

$$cr\varepsilon - \frac{1}{3}gr^3 - gr^2\varepsilon = 0.$$

Выделив из этого равенства ε и учтя $gr \ll c$, получим $\varepsilon \approx \frac{gr^2}{3c}$. Величину ε можно выразить через полную энергию осциллятора $cr^2/2$, которая, в свою очередь, сравнима с тепловой энергией: $cr^2/2 \approx kT$. Таким образом, точки поворота смещаются на величину

$$\varepsilon \approx \frac{gr^2}{3c} = \frac{2g}{3c^2} \cdot \frac{cr^2}{2} \approx \frac{2g}{3c^2} \cdot kT = \frac{2gk}{3c^2} \cdot T.$$

Смещение точек поворота сравнимо со смещением среднего положения Δ , которым и определяется тепловое расширение. Итак, мы нашли вид зависимости коэффициента теплового расширения от констант c , g и от температуры. Строгий расчёт меняет только численный множитель:

$$\Delta = \frac{3}{4} \frac{gk}{c^2} T.$$

Относительное тепловое расширение тела есть отношение изменения среднего расстояния между частицами к расстоянию между ними и в рамках нашей модели совпадает с отношением Δ к r_0 :

$$\frac{\Delta}{r_0} = \frac{3}{4} \frac{gk}{c^2 r_0} T = -T.$$

Таким образом, коэффициент линейного теплового расширения равен:

$$\alpha = \frac{3}{4} \frac{gk}{c^2 r_0}.$$

Объёмное тепловое расширение

Коэффициент **объёмного расширения** β определяется аналогично:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT}. \quad (2)$$

Если тело расширяется одинаково по всем направлениям, то легко найти эту величину.

Это соотношение справедливо для **монокристаллов** с кубической симметрией, для **поликристаллов** и для многих **аморфных тел**.

Монокристаллы (кроме кубических) обладают **анизотропией** теплового расширения, т. е. коэффициент α будет иметь различные значения для различных направлений внутри кристалла.

Связь теплового расширения и теплоёмкости

Тепловое расширение и теплоёмкость C связаны друг с другом, так как оба этих явления зависят от амплитуды колебаний **кристаллической решётки**. Тепловое расширение связано с увеличением среднего расстояния между частицами, а теплоёмкость — с увеличением средней энергии тепловых колебаний.

Отношение величин α и C для данного вещества не зависит от температуры (закон, открытый Э. Грюнайзеном эмпирически в 1908 году). При высоких температурах обе величины α и C от температуры не зависят. В области низких температур обе величины уменьшаются с уменьшением T и стремятся к нулю при $T \rightarrow 0$ К согласно третьему закону термодинамики.

Лабораторная работа 21

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ ПРИ НАГРЕВАНИИ

Перед началом работы необходимо ознакомиться с введением по теме: «Тепловые свойства твёрдых тел».

Цель работы: определить коэффициент теплового расширения металлического стержня при помощи **оптического дилатомера (дилатометра)**.

Физическое обоснование эксперимента

Коэффициент линейного расширения, который характеризует удлинение тела при нагреве, определяется формулой (1) (см. введение). На практике производная заменяется на конечную разность и определяется средний коэффициент расширения в некотором интервале температур ΔT :

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{l - l_1}{T - T_1} = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (21.1)$$

где l и l_1 — длина тела при температурах T и T_1 ; l_0 — его длина при некоторой стандартной температуре (обычно 0 или 20°C).

При определении коэффициента α необходимо обеспечить высокую точность измерения малых изменений длины тела. Приборы для измерения расширения тел под действием внешних факторов (температура, давление, электрическое поле и др.) называются дилатометрами (что в переводе с греческого означает измеритель расширения).

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из термостата, дилатомера и водяной бани, в которую помещается исследуемый стержень. Температура измеряется ртутным термометром с точностью до 0,5°C.

Нагретая вода прогоняется при помощи насоса по шлангам через во-

дьяную баню, в которую помещён исследуемый стержень. Его удлинение измеряется с помощью **вертикального оптического дальномера ИЗВ-1**. Это прибор высокого класса точности, которая достигается при помощи оптико-механических методов отсчёта.

Дальномер (рис. 21.1) имеет следующие основные характеристики: точность измерений в пределах до 100 мм по аттестату шкал $\pm(0,001 + l/2 \cdot 10^5)$ мм, цена наименьшего деления окулярного микрометра 0,001 мм при подъёме измерительной головки до 250 мм.

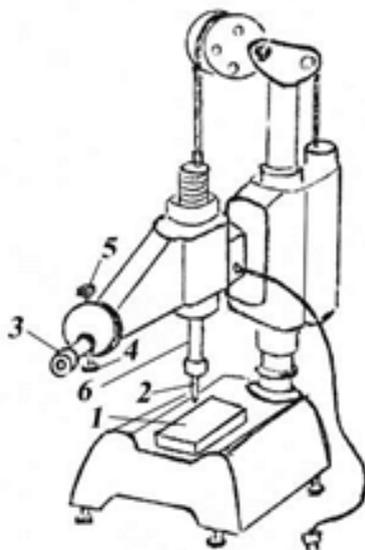


Рис. 21.1. Дальномер ИЗВ-1.

Исследуемый стержень закрепляется на столике 1 дальномера, наконечник 2 измерительного стержня 6 опускается до контакта со стержнем, отсчёт длины производится по спиральному окулярному микрометру. Винтом 5 можно перемещать окуляр вверх или вниз для установления начала отсчёта перед началом измерений. В ходе измерений вращать **винт 5 нельзя!**

В поле зрения **отсчётного микроскопа 3** находятся следующие элементы, подсвеченные осветительным устройством (рис. 21.2а):

1. Основная шкала, связанная со стержнем 6. На неё нанесено 100 делений с расстоянием **между** ними 1 мм.

2. Вертикальная неподвижная шкала с 10 делениями по 0,1 мм.
3. Круговая вращающаяся шкала, на которую нанесено 100 делений, соответствующих 0,001 мм.
4. Спираль Архимеда, нанесённая на одной пластинке с круговой шкалой. Расстояние между витками спирали равно цене деления прямолинейной шкалы (0,1 мм). Начало круговой шкалы (отсчёт «0») соответствует такому положению спирали, когда каждый её виток совпадает с соответствующей риской вертикальной шкалы 2.

Отсчёт выполняется следующим образом (см. пример на рис. 21.26):

1. Вращая спираль маховиком микрометра 4, совместить риску основной шкалы 1 с ближайшим витком спирали. Для повышения точности совмещения витки имеют вид двойных линий.
 2. По большой цифре основной шкалы определить число целых миллиметров (в данном примере 2 мм).
 3. По положению риски 1 относительно вертикальной шкалы 2 определить число десятых долей миллиметра (здесь риска между цифрами 1 и 2, что означает 0,1 мм).
 4. По круговой шкале 3 определить микроны (здесь 58). При некотором навыке можно определить на глаз и десятые доли микрона, но это выходит за рамки погрешности прибора.
- Итак, всего $2+0,1+0,058=2,158$ (мм).

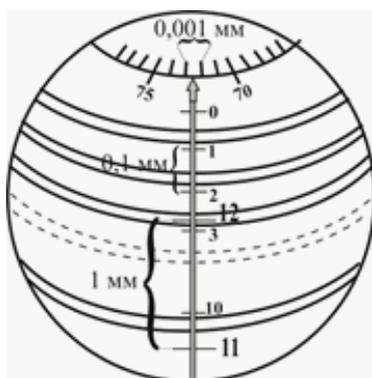


Рис. 21.2а. Шкала длиномера (общий вид с указанием цены деления для каждой шкалы).

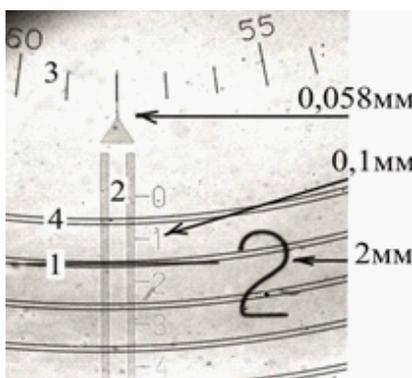


Рис. 21.2б. Пример отсчёта по шкале длиномера при наблюдении в окуляре микроскопа.

Преимуществом спирального микрометра является отсутствие мёртвого хода и одинаковость расстояния от глаза до всех цифр, что облегчает аккомодацию глаза.

Порядок выполнения работы

Под руководством лаборанта или преподавателя включить и проверить установку. Измерительная головка должна касаться изучаемого стержня и при небольшом усилии легко перемещаться вверх–вниз.

Потренироваться в измерениях, подкладывая листок бумаги в один и несколько слоёв и проверяя расчётом полученные результаты. Снять показания длиномера при начальной (комнатной) температуре.

Включить насос, прогоняющий воду из термостата через водяную баню, служащую для нагревания исследуемого стержня.

Включить нагреватель.

Удлинение стержня измерять в интервале температур от комнатной до (ориентировочно) 80°C через 5 или 10°C (по указанию преподавателя). Нагрев выше 80°C обязательно согласовывать с преподавателем во избежание возможного закипания воды и нарушения работы установки. Температура измеряется ртутным термометром с точностью до $0,5^{\circ}\text{C}$.

Проведение измерений

Предварительно запишите длину стержня при комнатной температуре l_0 , которая указана на установке.

Измерения проводятся одним из двух способов (по указанию преподавателя).

1. Непрерывный нагрев

Не выключая нагреватель и насос, непрерывно следить за показаниями термометра и длиномера и записывать их через каждые 5 градусов (или с другим шагом по указанию преподавателя). Температура стержня отстаёт во времени от температуры воды, но это отставание незначительно и практически не меняется по ходу нагрева. Поскольку нам требуется не сама температура, а её изменение, это отставание не вносит ошибок в результат.

2. Ступенчатый нагрев

Выключить нагреватель (*насос не выключать!*), нагрев воду до требуемой температуры, и следить за показаниями длиномера в течение нескольких минут. Если длина стержня перестала меняться, это означает, что установилось тепловое равновесие между стержнем и водой. (Режим измерения, т. е. интервалы времени и общее время наблюдения, согласовать с преподавателем.)

Снимать показания термометра и длиномера. Результаты измерений записать в следующую таблицу:

1.	$t^{\circ}\text{C}$	$l, \text{мм}$	$\Delta l = x$	$\Delta l = y$
2.	t_1	l_1	$t_2 - t_1$	$l_2 - l_1$
3.	t_2	l_2	$t_3 - t_1$	$l_3 - l_1$
4.	t_3	l_3	$t_4 - t_1$	$l_4 - l_1$

В изучаемом интервале температур коэффициент теплового расширения можно с достаточной точностью считать постоянным. Поэтому выражение (21.1), переписанное в виде $\Delta l = -l_0 \Delta T$, выражает линейную зависимость Δl от ΔT с угловым коэффициентом (тангенсом угла наклона прямой) $a = -l_0$. Найдя методом наименьших квадратов величину a и её доверительные границы Δa , получим α и $\Delta \alpha$:

$$\alpha = \frac{a}{l_0}, \quad \Delta \alpha = \frac{\Delta a}{l_0}.$$

Содержание отчета

1. График зависимости удлинения стержня от температуры.
2. Таблица наблюдений и расчётов по МНК тангенса угла наклона прямой в зависимости $\Delta l = f(\Delta t)$.
3. Значение величины α и доверительные границы для неё, рассчитанные по МНК.

Контрольные вопросы

- ? Какие силы действуют между частицами твёрдого тела, как они зависят от расстояния?
- ? Чем объясняется расширение тел при нагревании?
- ? Какова связь между коэффициентом линейного и объёмного расширения для изотропных тел?

Тема: ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Введение

В лабораторной работе 17 **вязкость** рассматривалась с феноменологической точки зрения, рассмотрим теперь это понятие с микроскопической точки зрения. В молекулярно-кинетической теории устанавливается связь между макропараметрами (характеризующими состояние газа в целом, например, давление, температура и т. п.) и величинами, характеризующими одну молекулу газа (масса молекулы, её скорость и диаметр).

Согласно молекулярно-кинетической теории газа хаотическое движение молекул является физической причиной наблюдаемых в газах **явлений переноса: теплопроводность** — при выравнивании температур (перенос теплоты), **диффузия** — при выравнивании концентраций (перенос вещества) и **вязкость** — при выравнивании скоростей направленного движения молекул (перенос импульса). Хотя тепловые скорости движения молекул газа велики (сотни метров в секунду), процессы переноса совершаются относительно медленно, так как столкновения между молекулами препятствуют их прямолинейному движению и заставляют их двигаться по ломаным траекториям.

Силы взаимодействия между молекулами становятся заметными лишь при малых расстояниях между ними. Поэтому можно считать, что между соударениями молекулы движутся прямолинейно и равномерно, а изменения вектора скорости и траектории происходят только при их столкновении.

Среднее расстояние, которое проходит молекула за время между двумя последовательными столкновениями, называется **длиной свободного пробега молекул** $\bar{\lambda}$.

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры молекул, называется **эффективным диаметром молекулы** d . Эффективный диаметр молекулы несколько уменьшается с увеличением скорости молекул, т. е. с повышением температуры.

Приведём простые качественные соображения — они не строгие, но помогут понять смысл формул и самого явления.

Для всех **явлений переноса** характерно, что за счёт движения молекул происходит выравнивание в объёме жидкости или газа некоторой величины G , носителем которой эти молекулы являются (энергия, импульс, заряд и т. д.). В простейшей «плоской» геометрии в газе мысленно выделяются плоскопараллельные слои, считается, что в каждом слое величина G постоянна, а её перенос идёт за счёт того, что молекулы, двигаясь хаотично по разным направлениям, переходят из слоя в слой.

Перенос величины G в соседний слой тем интенсивнее, чем больше средняя скорость молекул \bar{u} . Кроме того, если средняя длина свободного пробега $\bar{\lambda}$ станет, например, вдвое больше, то и длина, на которую происходит перенос в каждом пробеге, увеличится вдвое. Поэтому **коэффициент переноса** пропорционален \bar{u} и $\bar{\lambda}$.

В случае **вязкого трения** имеет место перенос импульса, поэтому коэффициент переноса, называемый в этом случае **вязкостью** η , зависит ещё и от массы частиц m и, тем самым, от плотности среды ρ .

Наконец, молекулы движутся одинаково в трёх измерениях, а мы рассматриваем перенос только по одному из них (перпендикулярно упомянутым слоям). Это приводит к появлению множителя $1/3$. В итоге

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \bar{u} \bar{\lambda} . \quad (1)$$

В разных моделях и при разных геометриях и скоростях потока в формуле (1) вместо $1/3$ может быть и другой множитель.

Эффективный диаметр молекулы. Объём, приходящийся на одну молекулу и равный их обратной концентрации $1/n$, связан с объёмом $\pi d^2 \bar{\lambda}$, который «заметает» молекула, пролетая от одного столкновения до другого (диаметр, а не радиус, так как в момент столкновения расстояние между центрами модельных шарообразных молекул равно как раз их диаметру). Учёт взаимного движения молекул даёт ещё множитель $\sqrt{2}$, тогда связь объёма и концентрации принимает вид:

$$\sqrt{2} \pi d^2 \bar{\lambda} = \frac{1}{n} . \quad (2)$$

Таким образом, зная концентрацию n и среднюю длину свободного пробега $\bar{\lambda}$, можно определить эффективный диаметр молекул.

Лабораторная работа 23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ГАЗА. РАСЧЁТ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ГАЗА

Перед началом работы необходимо ознакомиться с введением по теме: «Явления переноса».

Цель работы: определить вязкость воздуха и рассчитать среднюю длину свободного пробега и эффективного диаметра молекул, входящих в состав воздуха.

Физическое обоснование эксперимента

Основные количественные данные для определения длины свободного пробега молекул и их диаметров были получены из исследования явлений переноса.

В данной работе предлагается вычислить скорость молекул из законов молекулярно-кинетической теории, найти плотность и концентрацию газа (всё это можно сделать до начала работы, зная температуру в помещении), экспериментально определить вязкость воздуха и вычислить его молекулярно-кинетические параметры.

Экспериментальное определение **коэффициента динамической** вязкости жидкости или газа может выполняться разными способами, например, по скорости движения тела в вязкой среде (метод Стокса, работа 17.1), по скорости протекания самой жидкости или газа (метод, применённый в данной работе).

Газ удобно пропускать через длинную (чтобы в большей части трубки установился контролируемый режим), тонкую (чтобы процесс был не слишком быстрым — для удобства измерения), цилиндрическую (для простоты расчётных формул) трубку.

Коэффициент вязкости η можно найти, воспользовавшись **законом Пуазейля**, определяющим объём газа V , протекающего через цилиндрический

капилляр при ламинарном режиме течения:

$$V = \frac{r^4 t \Delta p}{8 l \eta} \Rightarrow \eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 l V}, \quad (23.1)$$

где r — радиус капилляра; l — длина капилляра; Δp — разность давлений на концах капиллярной трубки, обуславливающая течение газа по ней; t — время, в течение которого вытекает газ данного объёма

Все величины, входящие в формулу (23.1), легко измерить.

Типичные значения коэффициента динамической вязкости газов при нормальных условиях — порядка 10^{-5} Па·с.

Для расчёта средней скорости теплового движения молекул газа используется **распределение Максвелла** — распределение молекул газа по скоростям:

$$f(u) = 4 \left(\frac{m}{2 kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mu^2}{2kT}} u^2.$$

Отсюда можно определить различные характерные скорости теплового движения молекул, в том числе и среднюю:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (23.2)$$

где $R \approx 8,31447$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура газа; μ — масса одного моля газа (для воздуха принято использовать средневзвешенную величину молярной массы $\mu = m N_A \approx 28,98$ г·моль⁻¹, т. е. воздух рассматривается в данном случае как газ, состоящий из одинаковых молекул), $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ — число Авогадро; $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ — постоянная Больцмана.

При комнатной температуре средняя скорость молекул в воздухе около 460 м/с

Плотность газа ρ получаем из закона Менделеева–Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \text{ тогда:}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT}, \quad (23.3)$$

где p — давление газа.

Из основной формулы кинетической теории газов получаем выражение

для концентрации:

$$n = \frac{P}{kT}. \quad (23.4)$$

Таким образом, если экспериментально определить вязкость газа η по его протеканию через капилляр (формула 23.1), рассчитать скорость его молекул \bar{u} по формуле (23.2) и его плотность ρ по формуле (23.3), можно подставить их в формулу (1) (см. Введение) и получить кинетические характеристики: среднюю длину свободного пробега

$$\bar{\lambda} = \frac{3\eta}{\rho \bar{u}} \quad (23.5)$$

и эффективный диаметр молекулы d

$$d = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2\pi n \bar{\lambda}}}} \approx \frac{0.474}{\sqrt{n \bar{\lambda}}}. \quad (23.6)$$

Формально говоря, можно подставить (23.1) и (23.2) в формулу (1) (см. Введение) и получить «окончательную» формулу, но она слишком громоздка, лишена наглядности и провоцирует на арифметические ошибки:

$$\bar{\lambda} = \frac{3\pi^{3/2}}{16\sqrt{2}} \cdot \frac{r^4}{l} \cdot \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \cdot \frac{\Delta p}{p} \frac{t}{V}. \quad (23.7)$$

Здесь выделены смысловые части формулы: численный множитель, параметры установки, характеристики газа, измеряемые величины.

Рекомендуется не использовать формулу (23.7), а получить промежуточные значения вязкости (23.1) и скорости (23.2), которые удобно контролировать, и которые к тому же сами по себе представляют интерес.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, позволяющая исследовать протекание газа (воздуха) через капилляр известных размеров под действием контролируемой разности давлений, изображена на рис. 23.1.

Цилиндрический сосуд закреплён вертикально на штативе. Верхнее отверстие сосуда закрыто резиновой пробкой со вставленным в неё капилляром. Снизу сосуд имеет кран. Сосуд заполняется на 4/5 дистиллированной водой.

Если открыть кран, то вода сначала выливается из сосуда непрерывной струёй, а затем — отдельными каплями.

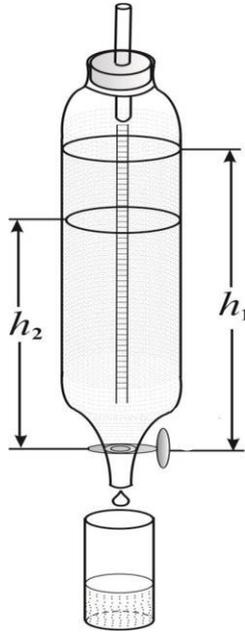


Рис. 23.1.

Через капилляр происходит натекание воздуха в сосуд, обусловленное разностью давлений Δp на концах трубки (верхний конец — атмосферное давление $p_{\text{ат}}$, нижний — меньше атмосферного). Когда вода вытекает из сосуда, объём части сосуда над поверхностью жидкости увеличивается.

Так как воздух попадает сюда через очень узкий капилляр, то он натекает медленно. Поэтому давление воздуха p_1 в этом объёме становится меньше атмосферного $p_{\text{ат}}$.

В момент, когда одна капля оторвалась, а следующая ещё не образовалась, наблюдается равенство давлений на площадь отверстия, через которое вытекает вода. Снизу давление равно атмосферному, а сверху — сумме давлений столба воды ($\rho_{\text{в}} g h_1$) и p_1 (давлением, обусловленным поверхностным натяжением, мы пренебрегаем).

$$p_{\text{ов}} = \rho_{\text{в}} g h_1 + p_1, \quad (23.8)$$

$$\Delta p_1 = p_{\text{ов}} - p_1 = \rho_{\text{в}} g h_1, \quad (23.9)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; h_1 — высота столба жидкости в момент отсчёта.

Затем атмосферный воздух натекает через капилляр, давление сверху

увеличивается, и выдавливается следующая капля.

За то время, пока уровень жидкости понижается от h_1 до h_2 , через капилляр натекает некоторое количество воздуха, давление воздуха в объёме становится равным p_2 и равенство давлений примет вид:

$$p_{\text{ов}} = \rho_2 g h_2 + p_2. \quad (23.10)$$

Разность давлений станет равной:

$$\Delta p_2 = p_{\text{ов}} - p_2 = \rho_2 g h_2. \quad (23.11)$$

Так как воздух натекает непрерывно, и различие между Δp_1 и Δp_2 невелико, то разность давлений в течение эксперимента можно представить как среднее арифметическое:

$$\Delta p = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2}{2} = \rho_2 g \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (23.12)$$

Объём воздуха, прошедшего через капилляр, можно считать равным объёму вытекшей воды, так как если вспомнить, что 1 атм = 10 метров водяного столба, то понятно, что давление в сосуде почти не отличается от атмосферного в ходе всего опыта.

Объём воды определяется либо с помощью мензурки, либо по её весу: $\rho_2 = m_2 / V_2$, где $\rho_{\text{в}} = 998,2 \text{ кг/м}^3 \text{ с}$.

Порядок выполнения работы

Для выполнения работы, кроме установки, понадобятся весы, линейка, секундомер, термометр, барометр. Указанные приборы либо находятся в лаборатории, либо их можно получить у дежурного сотрудника лаборатории.

Подготовьте таблицу для внесения измерений и результатов расчётов:

№ п.п.	$m_{\text{ст}}$	$\approx V_{\text{в}}$	h_1	t	h_2	$m_{\text{ст+в}}$	$m_{\text{в}}$	$V_{\text{в}}$	Δp	η	$\langle \bar{\lambda} \rangle$	d
единицы измерений												
погрешности												
1												
2												
3												
4												
5												

1. Взвесьте пустой стаканчик для воды.
2. Откройте кран и дождитесь капельного режима вытекания воды.

3. Подставьте под сосуд предварительно взвешенный стаканчик. Запишите высоту h_1 уровня воды в сосуде (Рис. 23.1), одновременно включите секундомер.
4. Когда накапает приблизительно заданный объём воды:
 - 4.1. закройте кран,
 - 4.2. выключите секундомер,
 - 4.3. замерьте высоту h_2 уровня воды в сосуде (Рис. 23.1),
 - 4.4. взвесьте стаканчик с водой (для точного определения объёма воды — это и будет объём воздуха, вошедшего в сосуд через капилляр (плотность дистиллированной воды при 20 С $\rho_{\text{в}} \approx 998,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$).
5. Измерьте комнатную температуру и атмосферное давление в лаборатории.
6. Повторите опыт (операции 2÷5) с другими количествами вытекшей воды, например, 50, 75, 100, 150 мл.
7. запишите радиус и длину капилляра, указанные на данной установке.

Обработка результатов

1. Рассчитайте среднюю скорость \bar{v} молекул по (23.2) (кроме температуры все параметры являются постоянными).
2. Рассчитайте концентрацию n молекул из формулы (23.4).
3. Для каждого опыта (см. «Порядок выполнения работы») на основе измеренных $m_{\text{в}}$, h_1 , h_2 и t вычислите последовательно следующие величины:
 - а) разность Δp по формуле (23.12),
 - б) вязкость η воздуха по формулы (23.1),
 - в) среднюю длину свободного пробега $\bar{\lambda}$ молекул, входящих в состав воздуха, по формуле (23.5),
 - г) эффективный диаметр d молекул, входящих в состав воздуха, по формуле (23.6).

Вычисление погрешностей

Напомним, что если относительные погрешности (в случае умножения и деления) или абсолютные (в случае сложения или вычитания) различаются во много раз, то меньшую погрешность можно не учитывать.

С точностью, заведомо избыточной для данной работы, известны значения $g \approx 9,819 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ (для Санкт-Петербурга), $\pi \approx 3,14159$, $R \approx 8,31447 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, $\rho_{\text{в}} \approx 998,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ (при 20 °С).

Формулы, необходимые для вычисления погрешности длины свободного пробега и эффективного диаметра молекулы, можно вывести самостоятельно как погрешности произведения.

Содержание отчёта

1. Рисунок установки.
2. Температура и атмосферное давление воздуха в помещении.
3. Размеры капилляра установки.
4. Таблица измеренных в каждом опыте значений Δp , t , V .
5. Расчёт средней скорости \bar{u} молекул, входящих в состав воздуха.
6. Расчёт концентрации n молекул.
7. Расчёт коэффициента вязкости η воздуха.
8. Расчёт длины свободного пробега молекулы.
9. Расчёт эффективного диаметра молекул, входящих в состав воздуха.
10. Расчёт погрешностей полученных значений $\bar{\lambda}$ и d .
11. Запись окончательных результатов работы с погрешностями.

Контрольные вопросы

- ? Какие явления называются явлениями переноса?
- ? Какое явление называется вязкостью?
- ? Что называется длиной свободного пробега молекулы?
- ? Что называется эффективным диаметром молекулы?
- ? Зависят ли $\bar{\lambda}$ и d от температуры газа?
- ? Какой метод определения коэффициента динамической вязкости применяется в данной работе?
- ? Какие приближения используются в данном методе?
- ? Почему в данной работе применяется длинный капилляр?
- ? Почему для начала отсчётов необходимо дождаться капельного режима истечения жидкости?

Литература:

- 📖. *Савельев И. В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5-ти томах. — 5-е изд., перераб. — Т. 3. Молекулярная физика и термодинамика. — СПб.: Изд-во Лань, 2011. — 224 с.
- 📖. *Соловьёв В. А., Яхонтова В. Е.* Основы измерительной техники. Руководство к лабораторным работам по физике. Учеб. пособие. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. — 216 с.
- 📖. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т. II. **Термодинамика и молекулярная физика.** — 5-е изд., — М.: Физматлит, 2005. — 554 с.
- 📖. *Зароченцева Е. П., Бобкова И. С., Малешина Н. А.* Математическая обработка результатов эксперимента. Методическое пособие для лабораторного физического практикума. Под ред. В. И. Короткова. — СПб.: ВВМ, 2009. — 52 с.
- 📖. *Бутиков Е. И., Кондратьев А. С., Уздин В. М.* Физика. Учебное пособие. В 3-х книгах. Книга 3. Строение и свойства вещества. — М.: Физматлит, 2021. — 336 с.

Учебное издание

Бармасов Александр Викторович
Высоцкая Софья Олеговна
Лисаченко Дмитрий Андреевич
Кудря Светлана Александровна
Подсевальникова Анна Николаевна
Рудакова Тамара Викторовна

Описания лабораторных работ
Учебной лаборатории физического эксперимента
СПбГУ

Часть III

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Компьютерная верстка: *В. В. Мещерин*

Подписано к печати 18.01.2024. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Печ. л. 4,18. Тираж 30 экз. Заказ 2200.

Отпечатано в Издательстве ВВМ
198095, Санкт-Петербург, ул. Швецова, 41.