

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАЗАНСКОГО (ПРИВОЛЖСКОГО) ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
Кафедра общей физики

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ
ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ и ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Процессы переноса.

Казань – 2019

УДК 530.10
ББК 22.36
Э 41

Печатается по рекомендации
Учебно-методической комиссии
Института Физики
Казанского (Приволжского) федерального университета

Составители:
профессор кафедры общей физики Ерёмина Р.М.
доцент кафедры общей физики Скворцов А.И.
доцент кафедры общей физики Мутыгуллина А.А.

Рецензент – В.А.Уланов, д.ф.-м.н., профессор кафедры промышленной электроники Казанского государственного энергетического университета

Э 41 Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса. / сост. Р.М. Ерёмина, А.И. Скворцов, А.А. Мутыгуллина. Казань: Казан.ун-т, 2019.-26с.

Методическое пособие «Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса.» предназначено для студентов естественно-научных специальностей университетов. Приводятся описания лабораторных работ физического практикума общего курса физики, раздел «Молекулярная физика и термодинамика», по теме «Процессы переноса». В каждой работе даны подробные описания установок, ход выполнения работ и список вопросов для самостоятельной подготовки.

УДК 530.10
ББК 22.36
Э 41

©Казанский университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

221. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ ЕДИНИЧНОЙ ПЛАСТИНЫ	4
222. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА.....	11
223. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ НА ШАРИКОВОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ	15
224. ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ.....	21
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ.....	25

221. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ ЕДИНИЧНОЙ ПЛАСТИНЫ

Введение

Количество теплоты ΔQ , которое за время Δt проходит через образец строительного материала, пропорционально разности температур ΔT между передней и задней сторонами пластины, площади поверхности пластины S и обратно пропорционально толщине пластины d .

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta T \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности λ называется теплопроводностью. В методе единичной пластины теплопроводность определяется непосредственным измерением теплового потока $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$:

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{d}{S \cdot \Delta T} \quad (2)$$

При проведении измерений необходимо быть уверенным в том, что тепловой поток проходит только через образец (других причин для утечки количества теплоты нет), и что он является однородным. Для этого по показаниям цифрового температурного датчика и контроллера (666198) необходимо следить за тем, чтобы температура внутри камеры сохраняла свое значение. Следует отметить, что в работе используется калориметрическая камера с теплоизоляционными стенками.

Таким образом, значение электрической энергии ΔW , излучаемой нагревателем в течение промежутка времени Δt , равно количеству теплоты ΔQ , которое за этот промежуток времени проходит через образец строительного материала:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Теплопроводность λ может быть вычислена с помощью соотношения:

$$\lambda = \frac{\Delta W}{\Delta t} \cdot \frac{d}{S \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Цель работы

- ✓ Исследование физического явления теплопроводности и накопления тепла в строительных материалах

Решаемые задачи

- ✓ Определение теплопроводности для различных строительных материалов

Техника безопасности

- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с нагревательным элементом

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

1. Калориметрическая камера с теплоизоляционными стенками.
 2. Канал для термометра или датчика температуры, измеряющего температуру воздуха в камере.
 3. Внутренность камеры с отделением из поролонового покрытия для вставки стеновых материалов (9 -13) или образцов строительных материалов.
 4. Три канала для измерения температуры в экспериментах с набором строительных материалов.
 5. Розетки для вставки нагревателя (7).
 6. Пара 4мм разъемов для напряжения питания нагревателя (7), электрически связанного с (5).
 7. Нагреватель: трубчатая лампа, 24В, 10Вт, на пластине с 4мм заглушкой для подключения в (5).
 8. Накопитель для тепла (алюминий вес ≈ 500 г).
 9. Стеновые материалы для размещения в (3) Размеры: 15см·15см:
 10. Керамическая плитка, толщиной 11мм;
 11. Алюминиевая пластина, толщиной 3мм;
 12. Пластина из пенополистирола, толщиной 10мм;
 13. Пластина из оргстекла, толщиной 1,5мм;
 14. Пластина из оргстекла с прокладками, толщиной 1,5мм (используется в совокупности с (12) для имитации изолирующего остекления).
 15. Крючок для удаления стеновых материалов из калориметрической камеры (3).
 16. Резиновые пробки для канала (2): без скважины; с отверстием $\varnothing 1,5$ мм (для температурного датчика 666 193) с отверстием $\varnothing 6$ мм (для стеклянного термометра 38234).
 17. Сенсор NiCr-Ni
 18. Цифровой термометр с одним входом.
 19. Цифровой температурный датчик и контроллер.
 20. Трансформатор 2-12 В, 120 Вт.
 21. Секундомер
 22. Ноутбук с программой CASSY Lab 2.
- В эксперименте используется калориметрическая камера (см. Рис.1):

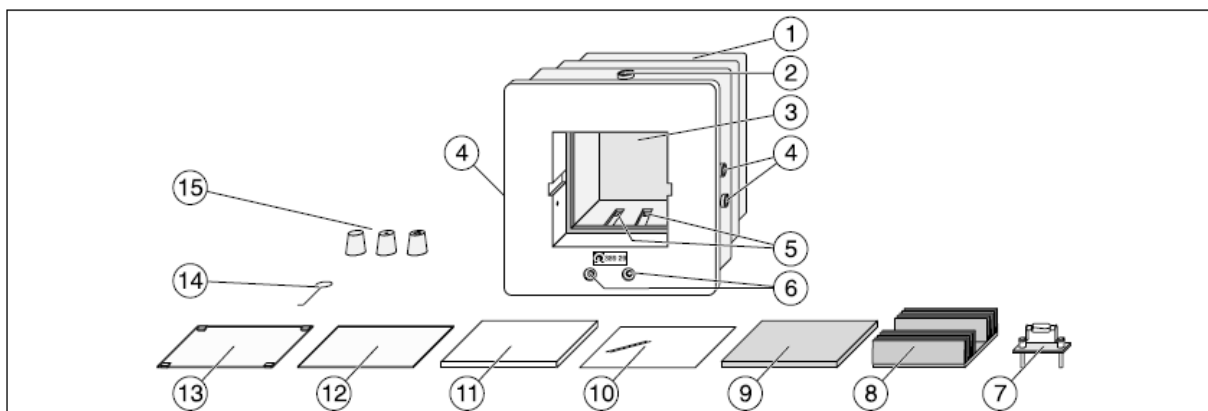


Рис.1



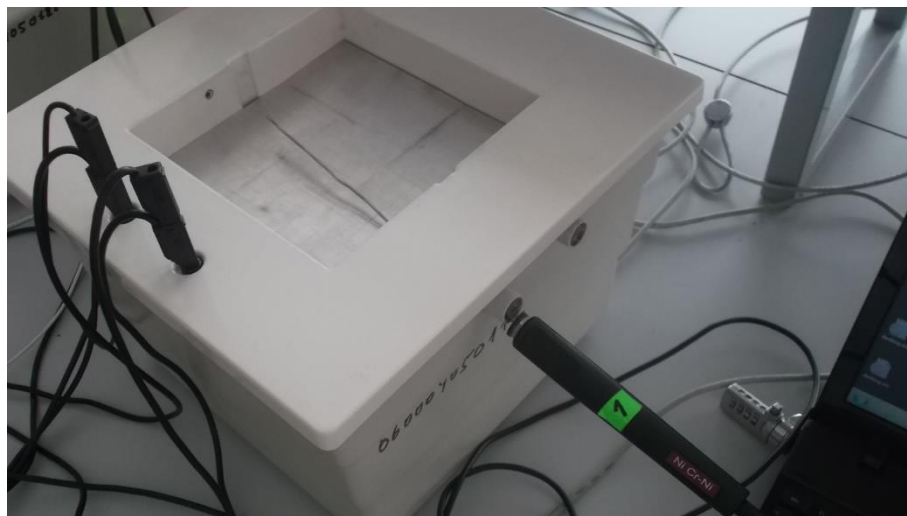
Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Строительные материалы, представленные для изучения:
2. а) ДСП б) Пенопласт в) Гипсоволокно
3. Установите исследуемый образец строительного материала в калориметрическую камеру. Порядок сборки установки для исследования выбранного вами строительного материала следующий:
 - а) Установите вспомогательную алюминиевую пластину в отделение из

поролонного покрытия калориметрической камеры.

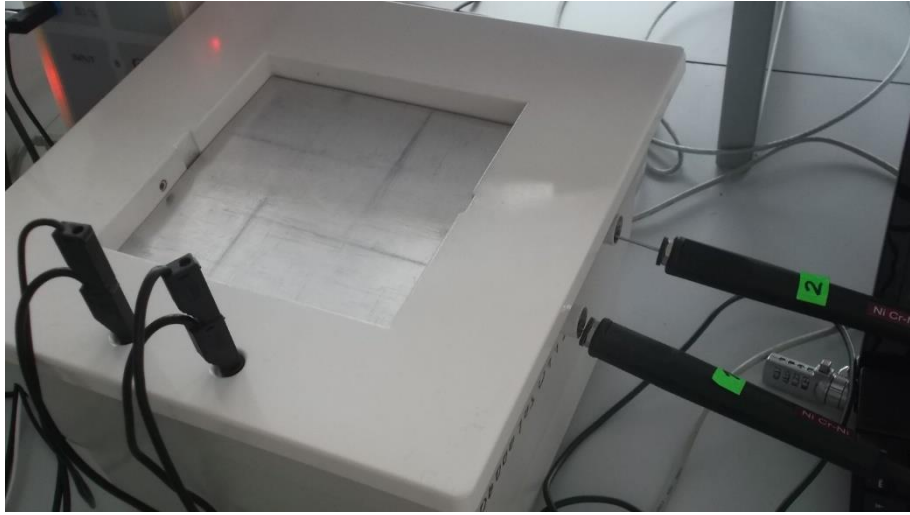
- б) Для измерения температуры перед образцом строительного материала вставьте сенсор температуры NiCr-Ni (термопару) в один из каналов (4) (который располагается ниже).



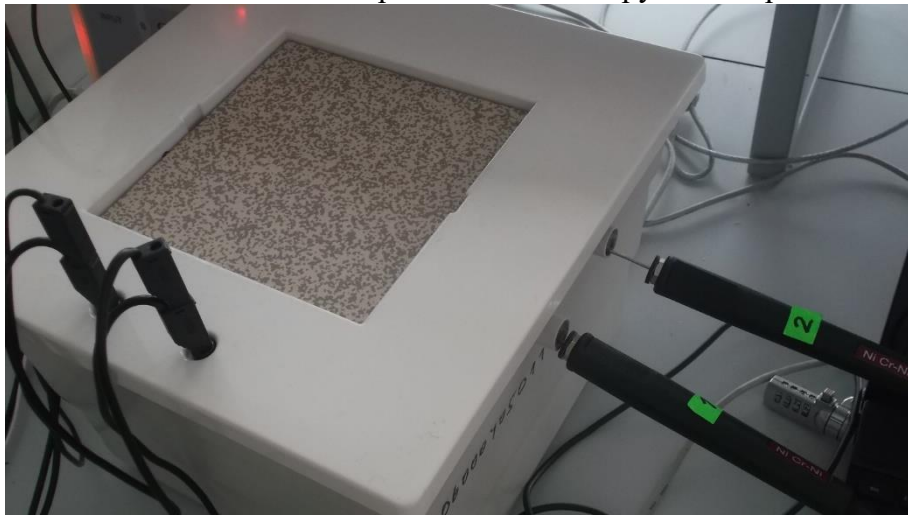
- в) в) Далее установите исследуемый образец так, чтобы металлический сенсор термопары **1** попал в гнездо для термопары на строительном материале.
- г) г) Сверху образца установите термопару **2**. Теперь у вас установлены термодатчики так, что первая термопара измеряет температуру на внутренней поверхности образца (внутри калориметрической камеры), а вторая термопара измеряет температуру на внешней поверхности.



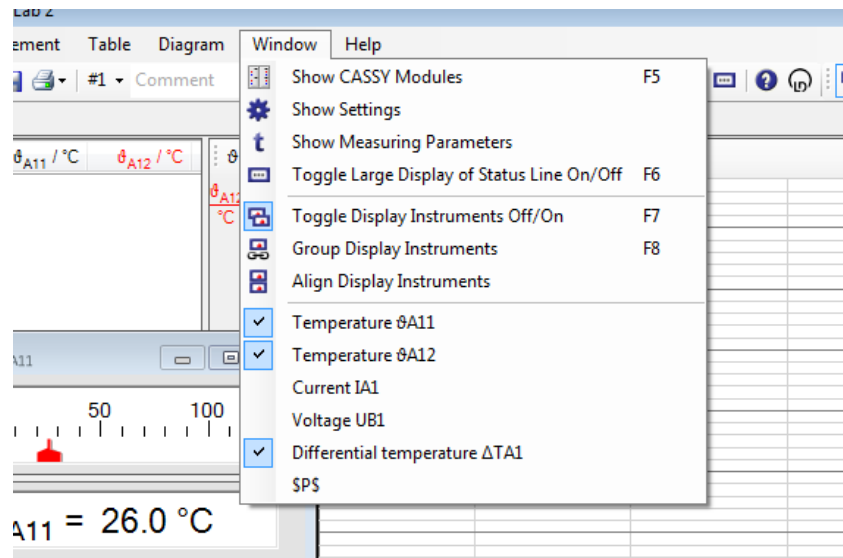
- д) Установите вторую алюминиевую пластину поверх термопары **2** на исследуемом образце.



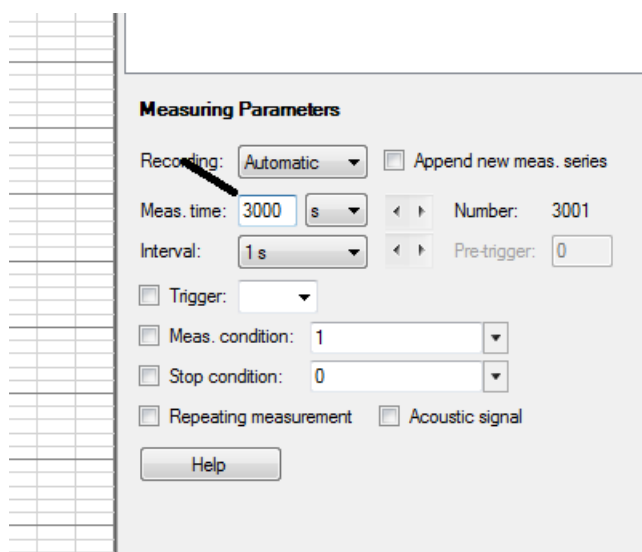
е) На последнем этапе необходимо прижать всю конструкцию керамической плиткой.



4. Включите компьютер. Откройте программу CassyLab2. Загрузите файл с [D:/эксперименты/221.labx](#)
5. Зайдите в закладку Window. Выберите Show Measuring Parameters, у вас появится справа окно, где указаны Measuring Parameters



6. В окне справа измените время измерений Meas. Time с 1000 сек на 3000 сек. Это время ваших измерений.



7. Подключите к нагревателю напряжение питания с трансформатора через разъемы (6). В качестве нагревателя используется трубчатая лампа со следующими характеристиками $U=24$ В, $P=2,68$ Вт. Включите трансформатор.



8. Запустите начало измерений, нажав кнопку F9. Получите с помощью программы CassyLab2 график зависимости температуры внутренней и внешней поверхности образца строительного материала, а также их разность от времени. Выбранное вами время $t=3000$ секунд.
9. Воспользовавшись формулой (3), определите значение теплопроводности строительного материала. Для этого измерьте мощность электрической энергии нагревателя с помощью ваттметра. Провести измерения силы тока и напряжения. Ширину и длину образца, необходимые для вычисления площади поверхности образца, измерьте с помощью линейки.
10. Повторите эксперимент с другими образцами строительных материалов.
Комментарии: Из калориметрической камеры первыми удаляются термпары. Учтите,

что пока нагреватель (7) и накопитель тепла находятся в камере, **нельзя удалять строительные материалы, наклонив камеру**. Используйте для этого монтажный крюк (14). Вставьте монтажный крюк в одну из плоских канавок между строительным материалом и внутренней стенкой камеры, аккуратно нажмите на нее ниже строительного материала и действием рычага вытащите соответствующую пластину. Старайтесь не повредить поролоновое покрытие.

11. Сравните полученные вами результаты с табличными.

Материал	Значение
Дерево	0,07-0,17 Вт/мК
Полистирол	0,16-0,18 Вт/мК
Гипсоволокно (Fermacell)	0,23-0,28 Вт/мК
Полиметакриламид (Rohacell)	0,02-0,05 Вт/мК

222. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Введение

На шарик, падающий в вязкой среде, действует сила тяжести mg , сила Архимеда F_A и сила сопротивления среды – сила Стокса F_{AC} .

$$mg = \rho_s Vg \quad (1)$$

$$F_A = \rho Vg \quad (2)$$

$$F_C = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

где V – объем шарика, v – скорость шарика, ρ_s – плотность шарика, ρ – плотность среды, g – ускорение свободного падения. Сумма всех сил действующих на тело равна ma , при условии, что число $Re \ll 1$; жидкость заполняет все пространство; жидкость смачивает шарик, т.е. прилегающий к шарикку слой жидкости движется вместе с ним.

По второму закону Ньютона:

$$V\rho_s \frac{dv}{dt} = Vg(\rho_s - \rho) - 6\pi r_s \eta v \quad (4)$$

Решаем дифференциальное уравнение методом деления переменных:

$$dt = \frac{dv}{g\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) - \frac{6\pi r_s \eta v}{V\rho_s}} = \frac{dv}{a - bv} \quad (5)$$

где $a = g\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)$, а $b = \frac{6\pi r_s \eta}{V\rho_s}$.

После замены переменных $z = a - bv$, получаем выражение:

$$-bdt = dz/z$$

Проинтегрируем это уравнение, отсчитывая время сначала падения $t=0, v=0$.

$$-bt = \ln\left(\frac{z(t)}{z(0)}\right), \text{ или } z(t) = z(0)\exp(-bt),$$

Или

$$v(t) = \frac{a}{b}(1 - \exp(-bt)) = \frac{gV(\rho - \rho_s)}{6\pi\eta r_s} \left(1 - \exp\left(-\frac{6\pi\eta r_s t}{m}\right)\right) \quad (6)$$

Таким образом, скорость шарика экспоненциально приближается к постоянному предельному значению:

$$v_p = \frac{gV(\rho_s - \rho)}{6\pi\eta r_s} \quad (7)$$

Время, необходимое для достижения равновесного значения скорости, называется временем релаксации:

$$\tau = \frac{V\rho_s}{6\pi\eta r_s} \quad (8)$$

Если время падения в несколько раз больше времени релаксации, то процесс установления скорости можно считать законченным.

Преобразуем формулу (7), выразив коэффициент вязкости η , подставим выражение для объема шарика, получим:

$$\eta = \frac{2gr_s^2(\rho_s - \rho)}{9v_p} \quad (9)$$

При проведении эксперимента необходимо учитывать соотношение между радиусами шарика и сосуда путем введения поправочного множителя:

$$\eta = \frac{2gr_s^2(\rho_s - \rho)}{9v_p \left(1 + 2.4 \frac{r_s}{R}\right)} \quad (10)$$

Цель работы

- ✓ Измерение вязкости жидкости методом Стокса

Решаемые задачи

- ✓ Определение коэффициента вязкости глицерина

Техника безопасности

- ✓ **Внимание: в работе используется стекло.**
- ✓ **Будьте предельно аккуратны при работе со стеклянным сосудом и металлическим шариком.**

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Стеклянный сосуд с глицерином
- ✓ Стальной шарик
- ✓ Магнитный держатель со спусковым механизмом
- ✓ Пара цилиндрических магнитов с отверстиями

- ✓ Штангенциркуль
- ✓ Электронные весы
- ✓ Рулетка
- ✓ Секундомер
- ✓ Комнатный термометр



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Возьмите штангенциркуль, секундомер, рулетку у инженера или преподавателя.
2. Определите комнатную температуру с помощью термометра.
3. Измерьте внутренний радиус цилиндра R , и расстояние между метками и температуру в комнате.
4. Измерьте с помощью штангенциркуля радиус шарика r_s .

5. Рассчитайте объем шарика. На электронных весах определите массу шарика и рассчитайте его плотность.
6. Закрепите шарик на магнитном держателе с пусковым механизмом.
7. С помощью спускового механизма опустите шарик и определите время прохождения шариком расстояния между двумя отметками на цилиндре.
8. Вычислите скорость падения шарика. Проведите 10 измерений и определите среднюю скорость падения шарика.
9. Определите по формуле (10) вязкость жидкости и оцените погрешность. Сравните полученный результат с табличным значением вязкости глицерина.
10. По формуле (8) вычислить время релаксации скорости шарика.
11. По формуле (3) вычислить силу сопротивления среды.
12. Повторить пункты 3-10 для двух других шариков. Обязательно провести измерения с самым маленьким шариком.

223. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ОТ ЕЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ШАРИКОВОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ

Введение

Рассмотрим протекание жидкости по трубе. В том случае, когда соседние слои жидкости (или газа) перемещаются с различной скоростью, между ними действуют силы трения. Вязкостью называется свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Слой жидкости, непосредственно прилегающий к неподвижной плоскости, неподвижен. Линия тока жидкости в центре трубы перемещается с максимальной скоростью. В промежуточной области скорость течения жидкости зависит от расстояния.

Основной закон вязкого течения был установлен И. Ньютоном

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} S, \quad (1)$$

где сила трения F пропорциональна площади S плоскостей, перемещающихся относительно друг друга, и градиенту скорости dv/dr . Градиент dv/dr характеризует быстроту изменения скорости от слоя к слою. Коэффициент пропорциональности η называется коэффициентом динамической вязкости. Он характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению ее слоев. В системе СИ за единицу вязкости принят Паскаль·секунда, сокращенно – $Па \cdot с$. Жидкость имеет вязкость один $Па \cdot с$, если для сдвига плоскости площадью $1 м^2$ параллельно другой плоскости, расположенной на расстоянии $1 м$ от первой, со скоростью $1 м/с$ требуется сила $1 Н$. Если коэффициент динамической вязкости η отнести к плотности жидкости, то получившаяся величину называют коэффициентом кинематической вязкости

$$\nu = \eta / \rho; [\nu] = [\eta] / [\rho] = Па \cdot с / (кг / м^3) = м^2 / с.$$

Когда жидкость (газ) перемещается как бы слоями, упорядоченно, течение жидкости называют ламинарным. Ламинарное течение жидкости наблюдается, например, при достаточно медленном течении жидкости в трубе. С увеличением скорости движения ламинарное течение в некоторый момент переходит в турбулентное течение, возникают вихри, происходит интенсивное перемешивание слоев жидкости, сопротивление жидкости изменяется (рис. 1).

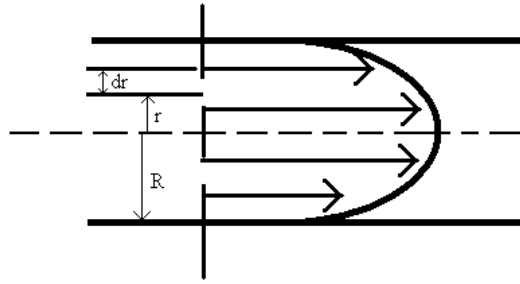


Рис. 1. Распределение скоростей движения жидкости в сечении трубы

Характер течения определяется числом Рейнольдса

$$Re = \rho v L_x / \eta, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, η – коэффициент динамической вязкости, v – скорость шарика, L_x – характерный размер тела. При рассмотрении течения жидкости в круглой трубе характерный размер имеет смысл радиуса трубы, а v имеет смысл средней скорости жидкости в сечении трубы. Если число Рейнольдса меньше критического значения $Re_{кр}$, то возможно только ламинарное течение. Если Re больше критического значения, течение может иметь переходный или турбулентный характер. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от состояния поверхности и других факторов. Для движения жидкости по трубе, как правило, $Re_{кр} = 2000 - 2200$.

В системе СГС вязкость измеряется в дина-секунда на квадратный сантиметр ($\text{дин}\cdot\text{сек}/\text{см}^2$), равная $1 \text{ г}/(\text{см}\cdot\text{сек})$ и названная пуазом (пз). Применяют дольные единицы пуаза — сантипуаз (спз), миллипуаз (мпз) и микропуаз (мпз).

Ньютоновская жидкость (названная так в честь Исаака Ньютона) — вязкая жидкость, подчиняющаяся в своём течении закону вязкого трения Ньютона

Примерами ньютоновской жидкости являются все низкомолекулярные вещества в жидком состоянии, их смеси и истинные растворы в них низкомолекулярных веществ (вода, органические жидкости, расплавленные металлы, соли и стекло при температуре выше температуры стеклования).

Экспериментальное изучение строения жидкостей показало, что в отличие от газов, жидкости обладают определенной структурой, называемой ближним порядком. Это означает, что число ближайших соседей отдельно выбранной молекулы, а также их взаимное расположение в среднем для всех молекул одинаковы. Подобно твердым телам жидкости мало сжимаемы, обладают большой плотностью; подобно газам – принимают форму сосуда, в котором находятся. Такой характер свойств жидкостей связан с особенностями теплового движения их молекул. По теории Я. Френкеля, молекулы жидкости, подобно частицам твердого тела, колеблются около положения равновесия, однако эти положения не являются постоянными. По

истечении некоторого времени, называемого временем оседлой жизни, молекула скачком переходит в новое положение равновесия на расстояние, равное среднему расстоянию между соседними молекулами. Для того чтобы молекула жидкости «перескочила» из одного положения равновесия в другое, должны нарушиться связи с окружающими ее молекулами и образоваться связи с новыми соседями. Для разрыва межмолекулярных связей требуется энергия E_a (энергия активации), выделяемая при образовании новых связей. Такой переход молекулы из одного положения равновесия в другое является переходом через потенциальный барьер высотой E_a . Энергию для преодоления потенциального барьера молекула получает за счет энергии теплового движения соседних молекул. Зависимость среднего времени свободной жизни молекулы (τ) от температуры жидкости и энергии активации выражается формулой, вытекающей из распределения Больцмана:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где τ_0 – средний период колебаний молекулы около положения равновесия, k – постоянная Больцмана. Чем чаще молекулы меняют свои положения равновесия, тем более текуча и менее вязка жидкость, т.е. вязкость прямо пропорциональна τ . Учитывая формулу (3), получим выражения для температурной зависимости вязкости:

$$\eta = A \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (4)$$

где A - const. Из графика температурной зависимости вязкости можно определить энергию активации. Для этого удобно прологарифмировать уравнение (4) $\ln \eta = \ln A + \frac{E_a}{kT}$ и построить график в координатах $\ln \eta$ и $1/T$. Тангенс угла наклона этого графика будет равен энергии активации, поделенной на постоянную Больцмана.

Вязкость жидкостей и газов измеряют приборами, называемыми вискозиметрами. В представленной работе вязкость жидкостей и газов определяется сравнительным методом, в котором вязкость жидкости определяется по формуле:

$$\eta = K \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot t, \quad (5)$$

где ρ_1 – плотность шарика, ρ_2 – плотность жидкости, K – коэффициент, зависящей от размеров и плотности конкретного шарика, t – время падения шарика в жидкости между двумя метками.

Цель работы

- ✓ Изучение вискозиметра Гепплера с падающим шариком
- ✓ Определение вязкости жидкости и энергии активации

Решаемые задачи

- ✓ Калибровка вискозиметра
- ✓ Измерение температурной зависимости динамической вязкости ньютоновской жидкости
- ✓ Определение энергии активации внутреннего трения жидкости

Техника безопасности

- ✓ **Внимание: не включайте нагреватель при отсутствии воды в емкости нагревателя.**

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Шариковый вискозиметр (Гепплера)
- ✓ циркуляционный термостат $20 \div +100^{\circ}\text{C}$
- ✓ секундомер
- ✓ силиконовые шланги, 7 мм Ø

Таблица 1. Масса и диаметр шариков

Номер шарика	Масса (грамм)	Диаметр (мм)	Материал
1	11.6918	14.280	сталь
2	4.45	15.647	стекло
3	4,61	15,81	стекло

Таблица 2. Вязкость и плотность жидкостей

	Жидкость	Вязкость при 25°C (мПа·сек)	Вязкость при 30°C (мПа·сек)	Плотность (кг/м ³)
1	вода	0.895	0.803	998.23
2	глицерин	945	600	1261



Рис.1. Лабораторная установка 1)Шариковый вискозиметр; 2)Нагреватель

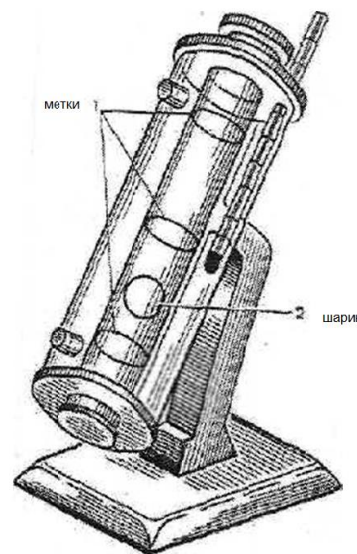
Порядок выполнения работы

Упражнение №1 Калибровка вискозиметра

1. Шарик (стальной или стеклянный) помещен в измерительную трубку вискозиметра, куда налита исследуемая жидкость (глицерин или вода). Калибровочный коэффициент K (постоянная вискозиметра) зависит от типа шарика. По данным таблицы 1 рассчитайте
2. плотность шарика, который используется в данной установке.
3. Переверните вискозиметр и измерьте время падения шарика в жидкости t между двумя крайними метками. Для этого включите секундомер когда нижняя часть шарика коснется верхней метки, и остановите, когда шарик достигнет нижней метки. Для более точного определения времени эксперимент следует проводить 4-6 раз.
4. Рассчитайте постоянную вискозиметра (калибровочный коэффициент шарикового вискозиметра) K по формуле:

$$K = \frac{\eta}{(\rho_1 - \rho_2) \cdot t},$$

где ρ_1 – плотность шарика; ρ_2 – плотность жидкости; η – динамическая вязкость известной жидкости, приведённая в таблице 2.



Упражнение №2 Измерение температурной зависимости динамической вязкости жидкости

1. Включите нагреватель. Установите на дисплее термостата температуру на 5 градусов выше комнатной. Для этого, используя клавишу «вверх» выделите вторую строчку. Нажмите «Enter» для редактирования. Перемещайте курсор клавишами «вправо» и «влево» и изменяйте цифры с помощью клавиш «вверх» и «вниз». Установите нужное значение температуры. Зафиксируйте установленное значение клавишей «Enter». Далее выделите третью строчку со значком и включите термостат нажав клавишу «Enter».
5. Дождитесь повышения температуры на 5 градусов и, не выключая термостат, измерьте время падения шарика в жидкости t между двумя крайними метками. Для более точного определения времени эксперимент следует проводить 4-6 раз.
6. Рассчитайте динамическую вязкость жидкости по формуле:

$$\eta = K \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot t,$$

где ρ_1 – плотность шарика; ρ_2 – плотность жидкости; K - индивидуальная константа, зависящая от типа шарика, рассчитанная в первом упражнении.

7. Проведите измерения при различных температурах (5-6 значений) до 60°C . Каждый раз, устанавливая значение температуры как в пункте 1. После каждого увеличения температуры ждите несколько минут, пока полностью прогреется исследуемая жидкость.

Упражнение №3 Определение энергии активации внутреннего трения жидкости

1. Постройте график зависимости коэффициента вязкости жидкости от абсолютной температуры в координатах η и T .
2. Постройте график зависимости коэффициента вязкости жидкости от абсолютной температуры в координатах $\ln \eta$ и $1/T$. По тангенсу угла его наклона определите энергию активации внутреннего трения E_a .

224. ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ

Введение

Метод Пуазейля основан на определении расхода жидкости или газа, протекающей через капилляр известных размеров, под действием заданного перепада давлений на краях капилляра.

Рассмотрим цилиндрическую трубку радиуса R и длины l . Пусть по ней течет жидкость, характеризующая плотностью ρ и вязкостью η . Пусть также на концах трубки поддерживается постоянная разница давлений ΔP .

Мысленно выделим в жидкости коаксиальный трубке цилиндрический объем радиуса r и высоты l . Из-за перепада давлений на концах трубки на него действует внешняя сила:

$$F^e = \pi r^2 \Delta P$$

Эта сила, в случае стационарного потока уравнивается силой внутреннего трения, определяемой формулой Ньютона:

$$F_{\text{тр}} = -\eta S_{\text{бок}} \frac{dv}{dr} = -\eta 2\pi r l \frac{dv}{dr} =$$
$$F^e = S_{\text{осн}} \Delta P = \pi r^2 \Delta P$$

Где $S_{\text{осн}}$ и $S_{\text{бок}}$ – площади основания и боковой поверхности выделенного объема жидкости. Отсюда приходим к дифференциальному уравнению:

$$dv = -\frac{\Delta P}{2\eta l} r dr$$

Если жидкость смачивает стенки трубки, можно считать, что вблизи них она неподвижна.

Тогда предыдущее уравнение легко интегрируется:

$$\int_0^v dv = -\frac{\Delta P}{2\eta l} \int_R^r r dr$$

Т.е. на расстоянии r от оси трубки жидкость имеет скорость:

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2) = v_0 - \frac{\Delta P}{4\eta l} r^2 \quad (1)$$

Смысл v_0 очевиден – это скорость на оси трубки.

Если выделить тонкий цилиндрический слой с внутренним радиусом r и внешним $(r+dr)$, можно считать, что вся жидкость в нем движется с указанной скоростью v . Тогда масса жидкости, протекающая через его поперечное сечение dS в единицу времени (расход):

$$dQ = \rho \cdot v dS = \rho \cdot \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2) (2\pi r dr)$$

Расход через все сечение S трубки в этом случае равен:

$$Q = \frac{\pi \Delta P \rho}{2\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \frac{\Delta P \pi \rho R^4}{8\eta l} = \frac{\nu_0 \rho S}{2} \quad (2)$$

Это равенство называется формулой Пуазейля, в честь английского экспериментатора, занимавшегося исследованием течения жидкости.

Пользуясь этой формулой, можно найти вязкость, пропуская жидкость через трубку длиной l и радиусом r . При этом необходимо измерить перепад давления ΔP на ее концах, а также объемный расход Q .

Однако, здесь существует одна тонкость. Необходимо быть уверенным, что на величину расхода заметно повлияла сила внутреннего трения. Проведем оценку оптимального размера трубки для вискозиметра. Найдем отношение кинетической энергии, ежесекундно переносимой потоком жидкости через поперечное сечение трубы K , к ежесекундно производимой работе сил внутреннего трения $A_{тр}$. Используя формулу (1) для скорости слоя, получим:

$$\begin{aligned} K &= \int_0^m \frac{dmv^2}{2} = \int_0^R \frac{\rho v^2}{2} \cdot 2\pi r v dr = \frac{1}{4} Q \nu_0^2 \\ A_{тр} &= -A^e = - \int_0^R \nu \Delta P 2\pi r dr = - \frac{4\eta \nu_0 l}{\rho R^2} \\ \left| \frac{A_{тр}}{K} \right| &= \frac{16\eta l}{\rho \nu_0 R^2} = \frac{8\pi \eta l}{Q} = \frac{16}{R_e} \cdot \frac{l}{R} = \frac{64\eta^2 l^2}{\rho \Delta P R^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Казалось бы, чем больше величина отношения, тем заметнее влияние сил внутреннего трения. Но в этом случае Q может оказаться слишком малым для проведения достаточно быстрого и точного измерения. При ламинарном течении число Рейнольдса R_e может достигать нескольких сотен. Поэтому для диапазона $10 < A_{тр}/K < 100$ значения l/R должны лежать в интервале $100 \div 1000$. Нижний предел для R разумно задать около миллиметра. Поскольку достаточно сложно изготовить капилляр с R менее миллиметра и точно измерить его радиус, что приведет к большим ошибкам при расчете по формуле (2). Длина l в несколько десятком сантиметров также непрактична. С учетом выше сказанного, оптимальным для вискозиметра представляется капилляр с диаметром около миллиметра и длиной около дециметра

Цель работы: освоение метода Пуазейля измерения вязкости.

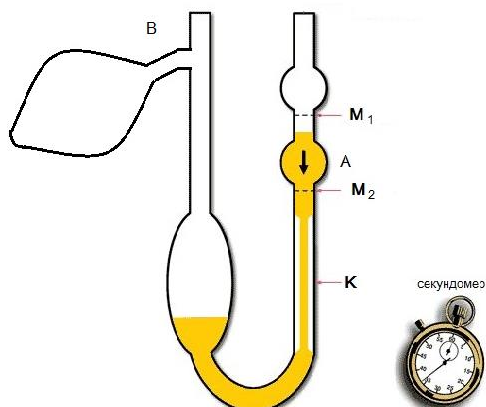
Задачи работы:

1. Знакомство с теоретическими основами метода Пуазейля;
2. Знакомство с устройством вискозиметра Оствальда;

3. Калибровка вискозиметра Оствальда;

4. Измерение вязкости спирта методом

Пуазейля.



Вискозиметр Оствальда представляет собой два стеклянных сообщающихся сосуда переменных диаметров (см. рис), в которые через широкую горловину колена В наливают исследуемую жидкость. Он работает на основе измерения времен перетекания через капилляр К одинаковых объемов исследуемой и эталонной жидкостей с известными плотностями. С помощью резиновой груши

жидкость закачивают из колена В в утолщение А выше метки M_1 и предоставляют ей возможность перетекать обратно под действием силы тяжести. Время t прохождения уровнем жидкости расстояния M_1 и M_2 засекают секундомером. Непосредственное измерение коэффициента вязкости η по формуле Пуазейля затруднительно, так как требует точного измерения многих величин, входящих в формулу (4). Поэтому предпочтительнее измерять не абсолютную величину η , а ее отношение к вязкости эталонной жидкости, например, воды η_B , перетекающей между метками данного вискозиметра за время t_B . Учитывая, что перепады давления на концах вертикального капилляра пропорциональны плотностям жидкостей ρ и ρ_B , на основе (4) можно записать

$$\frac{\eta}{\eta_B} = \frac{\frac{\pi t \Delta P r^4}{8 Q l}}{\frac{\pi t_B \Delta P_B r^4}{8 Q l}} = \frac{\Delta P t}{\Delta P_B t_B} = \frac{\rho t}{\rho_B t_B}$$

Или

$$\eta = \eta_B \frac{\rho t}{\rho_B t_B}$$

(4)

Принадлежности:

Термометр, секундомер, два вискозиметра Оствальда.

Вискозиметр Оствальда является хрупким устройством. Поэтому работать с ним необходимо предельно осторожно!

Ход работы.

1 Закрывать пальцем трубку В вискозиметра и грушей выдавить воду из колена В в утолщение А выше метки M_1 . (Во избежание грубых погрешностей необходимо, чтобы

после закачки жидкости в утолщение А, утолщение В оставалось частично заполненным. Необходимо также следить за тем, чтобы капелька жидкости случайно не перекрыла отверстие выше утолщения А. для устранения таких неполадок обращаться к лаборанту.

2. Убрать палец. Засечь секундомером время t_g прохождения уровнем воды расстояния между метками M_1 и M_2 .

3. Провести измерения несколько раз для нахождения среднего значения t_g и погрешности.

4. Повторить пункты 1-3 для спирта.

5. Измерить температуру в лаборатории. По справочным таблицам найти ρ , ρ_v и η_v .

6. Вычислить вязкость спирта и оценить погрешность эксперимента.

Контрольные вопросы и дополнительные задания

221. Исследование теплопроводности

1. Явления переноса (диффузия, теплопроводность, вязкость).
2. Какие связи называются ковалентными и ионными?
3. Период кристаллической решетки и его зависимость от температуры.
4. Сколько степеней свободы приходится на одну колебательную связь?
5. Линейный и объемные коэффициенты расширения твердых тел. Связь между ними.

222. Определение вязкости жидкости с помощью шарикового вискозиметра

1. Явления переноса (диффузия, теплопроводность, вязкость)
2. Какие течения жидкости называют ламинарными и турбулентными? Число Рейнольдса.
3. Какая физическая природа вязкости жидкости и газов? Как изменяется вязкость газа и жидкости при повышении температуры?
4. Вывод формулы зависимости скорости ламинарного течения в трубе от расстояния до центра трубы. (Закон Пуазейля).
5. Движение шарика в жидкости. Закон Стокса.
6. Как следует изменить массу и размер шарика для того, чтобы проводить измерения для более (менее) вязких жидкостей (газов)?

223. Исследование зависимости вязкости жидкости от температуры и концентрации на шариковом вискозиметре

1. Явления переноса (диффузия, теплопроводность, вязкость)
2. Какие течения жидкости называют ламинарными и турбулентными? Число Рейнольдса.
3. Какая физическая природа вязкости жидкости и газов? Как изменяется вязкость газа и жидкости при повышении температуры?
4. Вывод формулы зависимости скорости ламинарного течения в трубе от расстояния до центра трубы. (Закон Пуазейля).
5. Движение шарика в жидкости.
6. Как следует изменить массу и размер шарика для того, чтобы проводить измерения для более (менее) вязких жидкостей (газов)?

224. Измерение вязкости методом Пуазейля.

1. Сила внутреннего трения жидкости. Закон Ньютона.
2. Физический смысл коэффициента динамической вязкости.
3. Ньютоновские и неньютоновские жидкости.
4. Вывод формулы Пуазейля.
5. От чего зависит сила сопротивления движению жидкости в трубке?
6. Метод Пуазейля измерения вязкости.
7. Устройство вискозиметра Оствальда. Целесообразность утолщений на трубках и их относительного положения.

8. *Оцените давление внутри шприца при инъекции.

*Имея в виду формулы (2) и (3), оцените с какой точностью справедливо уравнение Бернулли для: а) воды. Вытекающей из ванны б) воды, вытекающей из водопроводного крана. В) природного газа в системе жилищного газоснабжения. Какие рекомендации и указания можно дать на основе этих данных конструкторам канализации, водопровода и газопровода