

## Лабораторная работа 2.18V

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ВОДНОГО РАСТВОРА ГЛИЦЕРИНА (ВИСКОЗИМЕТР ГЕППЛЕРА)

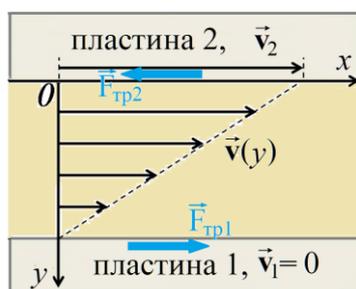
**Цель работы** – экспериментальное измерение динамической вязкости водного раствора глицерина при разных температурах, проверка справедливости уравнения Андраде и определение энергии активации.

### Теоретическая часть

Вязкость (внутреннее трение) – свойство газов и жидкостей сопротивляться перемещению одной их части относительно другой. Вязкость проявляется в возникновении сил внутреннего трения между слоями среды, движущимися друг относительно друга или относительно поверхности твердого тела.

Рассмотрим следующую ситуацию (см. рис. 1) в некоторой жидкости находятся две большие плоские пластины 1 и 2, первая – покоится, вторая – движется с постоянной скоростью  $\vec{v}_2$ .

а)



б)

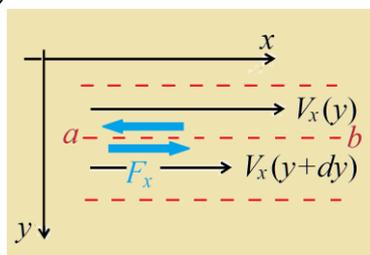


Рис. 1.

а) Две плоские параллельные друг другу пластины 1 и 2 в вязкой жидкости. Пластина 2 движется относительно пластины 1. При ламинарном течении жидкости между пластинами устанавливается распределение скоростей слоев  $\vec{v}(y)$ ;

б) На границе  $ab$  между соседними слоями, имеющими разную скорость, действует сила  $F_x$  внутреннего трения.

При не слишком большой скорости  $\vec{v}_2$  в жидкости между пластинами устанавливается такое упорядоченное распределение скоростей  $\vec{v}(y)$ , что жидкость можно рассматривать как набор слоев движущихся с разными скоростями. Причем скорости соседних слоев оказываются параллельны друг другу (см. рис. 1а). Такой режим течения жидкости называется ламинарным. При большой относительной скорости движения пластин характер движения жидкости между ними становится вихревым (турбулентным). При турбулентном режиме упорядоченность в распределении скоростей нарушается, движение жидкости сопровождается перемешиванием и пульсациями скорости и давления. В дальнейшем мы будем рассматривать только ламинарный режим течения жидкости.

Рассмотрим границу между двумя слоями, имеющими разную скорость (см. рис. 1б). В результате движения молекул и их взаимодействия более быстрый слой теряет импульс, более медленный – получает, т.е. происходит перенос импульса от более быстрого к более медленному слою. Так на рис. 1б происходит перенос  $x$ -проекции

импульса частиц среды в направлении оси  $y$ . С макроскопической точки зрения это означает, что на границе слоёв возникает сила трения  $F_x$ , стремящаяся затормозить движение слоев друг относительно друга. Эта сила называется силой вязкого (или внутреннего) трения. Заметим, что за счет сил межмолекулярного взаимодействия пластины на рисунке 1а также испытывают действие сил вязкого трения:  $\vec{F}_{тр1}$  и  $\vec{F}_{тр2}$ , соответственно.

На микроскопическом уровне возникновение силы внутреннего трения обусловлено следующими процессами. Во-первых, молекулы, находясь в тепловом движении, переходят из одного слоя в другой и переносят при этом средний импульс своего слоя в соседний. Во-вторых, на границе между слоями происходит взаимное выравнивание импульсов молекул за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Первый механизм передачи импульса характерен для разреженных газов, второй – для жидкостей.

Для многих сред величина силы внутреннего трения  $F_x$ , действующая на участке площадью  $\Delta S$  границы между слоями, пропорциональна площади участка и градиенту  $\frac{dV_x}{dy}$  скорости слоев. В этом случае на слой, лежащий ниже границы  $ab$  на рисунке 1б, действует сила

$$F_x = -\eta \frac{dV_x}{dy} \Delta S. \quad (1)$$

На слой, лежащий выше границы, действует такая же по модулю сила, но направленная противоположно. Коэффициент пропорциональности  $\eta$  в формуле (1) называется коэффициентом динамической вязкости. Этот коэффициент численно равен модулю силы, действующей на единицу площади поверхности каждого из взаимодействующих слоёв, при градиенте скорости, равном единице. В системе СИ коэффициент динамической вязкости измеряется в Па·с. Величина, обратная коэффициенту вязкости, называется текучестью.

Закон вязкого трения (1) был установлен Ньютоном и носит его имя, а жидкость, в которой он выполняется, называется ньютоновской. Примерами ньютоновской жидкости являются все низкомолекулярные вещества в жидком состоянии и их однородные смеси. Ньютоновской жидкостью является и водный раствор глицерина, свойства которого исследуются в данной работе.

Вязкость жидкостей обычно уменьшается с ростом температуры. Это связано со структурой жидкостей на молекулярном уровне и характером движения молекул. Молекулы в жидкости находятся близко друг к другу и силы межмолекулярного взаимодействия существенно влияют на движение молекул. В результате действия этих сил в жидкости (в отличие от газов) наблюдается, так называемый, ближний порядок: число ближайших соседей каждой молекулы и их взаимное расположение в среднем для всех молекул одинаковы.

Тепловое движение молекулы сводится в основном к колебаниям вблизи положения равновесия внутри потенциальной ямы, созданной соседними молекулами. Однако по истечении некоторого времени, называемого временем оседлой жизни, молекула может переместиться в «соседнюю» потенциальную яму. При этом положение равновесия молекулы скачком перемещается на расстояние равное среднему расстоянию между соседними молекулами. Для такого перескока рядом с текущим положением молекулы должно образоваться свободное место – вакансия – и молекула должна получить некоторую минимальную порцию энергии, для того чтобы преодолеть потенциальный барьер разделяющий две соседние потенциальные ямы. Минимальная энергия  $\varepsilon$ , необходимая для перескока молекулы, называется энергией

активации. Эту энергию молекула может получить за счет энергии теплового движения соседних молекул.

Текущее жидкости определяется долей молекул, получающих в единицу времени энергию, достаточную для перескока, и концентрацией ближайших к молекуле вакансий. С температуры обе величины растут, изменяясь приблизительно пропорционально бoльцмановскому множителю  $e^{-\varepsilon/kT}$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура). По такому же закону должна увеличиваться с ростом температуры и текущее жидкости. Как следствие, вязкость должна уменьшаться с ростом температуры пропорционально  $e^{\varepsilon/kT}$ . Действительно, эмпирическая зависимость коэффициента вязкости от температуры для многих жидкостей хорошо подчиняется уравнению:

$$\eta = Ce^{\varepsilon/kT}, \quad (2)$$

где  $C$  – слабо зависящий от температуры множитель, который при изменении от комнатной температуры вверх на несколько десятков градусов можно считать постоянным. Уравнение (2) часто называют уравнением Андраде по имени автора одной из первых научных работ, в которой эмпирически была установлена зависимость (2).

В соответствии с формулой (2) зависимость натурального логарифма вязкости  $\ln \eta$  от обратной температуры  $1/T$  должна быть линейной:

$$\ln \eta = a \left( \frac{1}{T} \right) + b, \quad (3)$$

с коэффициентами

$$a = \varepsilon/k; b = \ln C. \quad (4)$$

Близость графика  $\ln \eta$  от  $1/T$  к прямой линии служит подтверждением справедливости уравнения (2), а из наклона этой линии в соответствии с первой формулой (4) просто вычисляется энергия активации:

$$\varepsilon = ak. \quad (5)$$

Для характеристики высоты энергетического барьера, который приходится преодолевать молекулам при скачках между двумя соседними потенциальными ямами, кроме энергии активации  $\varepsilon$ , приходящейся на одну молекулу, используют также энергию активации  $E_a$ , приходящуюся на один моль:

$$E_a = \varepsilon N_A \quad (6)$$

где  $N_A$  – число Авогадро (количество молекул в одном моле). Учитывая, что произведение постоянной Больцмана и числа Авогадро  $kN_A$  равно универсальной газовой постоянной  $R$ , из соотношения (5) получаем формулу расчета величины  $E_a$  непосредственно через коэффициент линейной зависимости (3):

$$E_a = aR \quad (7)$$

Величину энергии активации  $\varepsilon$  одной молекулы обычно выражают в электронвольтах. Электронвольт внесистемная единица измерения энергии  $1\text{эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Дж. Энергия активации  $E_a$ , приходящаяся на один моль, как правило, указывается в кДж/моль.

Приборы для измерения вязкости называются вискозиметры. Одним из стандартных точных способов измерения вязкости жидкости является метод Гепплера (Hörpler). На вискозиметре, работающем по методу Гепплера, непосредственно измеряется времени падения шарика в наклонной трубке, заполненной исследуемой жидкостью. Вязкость жидкости вычисляется на основе этого времени.

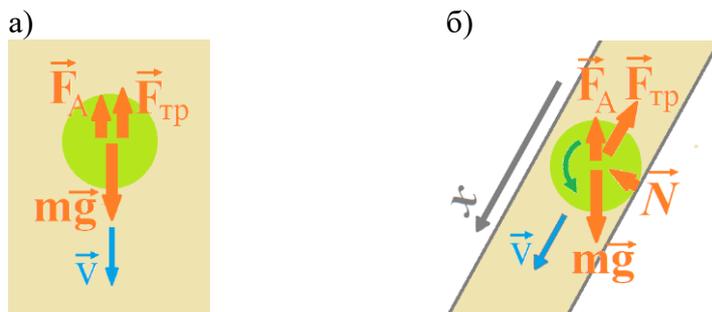


Рис. 2. Силы, действующие на шарик, движущийся в вязкой жидкости: а) при падении в безграничной жидкости; б) при установившемся движении в наклонной трубке, заполненной жидкостью.

Для того чтобы понять принцип работы вискозиметра Гепплера рассмотрим силы, действующие на шарик в более простом случае – при падении в широком сосуде, заполненном жидкостью (см. рис. 2а). Согласно закону Стокса, на шарик радиуса  $r$ , движущийся в безграничной жидкости с малой скоростью  $v$ , действует сила вязкого трения

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta vr \quad (8)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости. Кроме этой силы на шарик действует сила тяжести

$$mg = \rho Vg, \quad (9)$$

и сила Архимеда

$$F_A = \rho_0 Vg. \quad (10)$$

Здесь  $m$  – масса шарика;  $\rho$  – плотность шарика;  $V$  – его объем;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_0$  – плотность жидкости. Предполагается, что  $\rho > \rho_0$  и шарик тонет в жидкости.

Когда шарик начинает движение, сила трения мала и разность сил тяжести и Архимеда разгоняет шарик. По мере роста скорости сила трения растёт, разгон замедляется, и скорость шарика достигает значения  $v_*$ , при котором сила вязкого трения компенсирует разность силы тяжести и силы Архимеда:

$$F_{\text{тр}} = mg - F_A \quad (11)$$

Подставляя выражения для сил (8) – (10) в уравнение (11), получаем

$$6\pi\eta v_* r = Vg(\rho - \rho_0). \quad (12)$$

Если измерить время  $t$ , за которое шарик проходит некоторое расстояние  $l$  с установившейся скоростью  $v_*$ , то из уравнения (12) с учетом определения скорости  $v_* = l/t$  приходим к следующей формуле расчета вязкости.

$$\eta = \frac{Vg}{6\pi r l}(\rho - \rho_0)t. \quad (13)$$

В вискозиметре Гепплера шарик движется в наклонной трубке (см. рис. 2б), диаметр которой незначительно превышает диаметр шарика. Разность диаметров трубки и шарика в несколько десятков раз меньше диаметра шарика. Из-за наклона трубки шарик прижимается к стенке трубки, это обеспечивает постоянство формы зазора между шариком и трубкой. При этом появляется дополнительная сила реакции  $\vec{N}$  стенки. Кроме того из-за несимметричности зазора в начале движения результирующая сила трения создает крутящий момент, который заставляет шар вращаться.

Малое различие диаметров шарика и трубки обеспечивает существенную силу трения уже при небольшой скорости движения шарика, поэтому шарик практически сразу достигает установившегося значения скорости поступательного движения. При этом устанавливается также угловая скорость вращения шарика, при которой исчезает результирующий момент сил трения относительно его центра.

Установившаяся скорость поступательного движения шарика в трубке вискозиметра намного меньше, чем установившаяся скорость падения в безграничной жидкости. Поэтому прохождение шариком расстояния в несколько десятков сантиметров занимает достаточно большое время, что позволяет с помощью ручного секундомера измерить это время с малой относительной погрешностью. Малая линейная скорость точек на поверхности шара позволяет обеспечить ламинарный режим течения жидкости между шаром и стенками трубки даже в случае жидкостей с относительно небольшой вязкостью.

При ламинарном режиме течения жидкости проекция силы вязкого трения на ось  $x$  параллельную оси трубки (рис. 2б), пропорциональна коэффициенту вязкости жидкости и скорости движения шара:

$$F_{\text{тр},x} = -\alpha\eta v. \quad (14)$$

Коэффициент  $\alpha$  в этой формуле зависит от соотношения диаметров трубки и шарика. При установившейся скорости  $v_*$  движения шарика проекция силы трения (14) в сумме с проекциями на ось  $x$  силы тяжести (9) и силы Архимеда (10) должна давать ноль:

$$\rho V g_x - \rho_0 V g_x - \alpha\eta v_* = 0. \quad (15)$$

Здесь  $g_x$  – проекция вектора ускорения свободного падения на направление оси  $x$ . В вискозиметре измеряется время  $t$  прохождения шариком определенного расстояния  $l$ . Учитывая, что  $v_* = l/t$ , из уравнения (15), получаем формулу расчета вязкости:

$$\eta = K(\rho - \rho_0)t. \quad (16)$$

Коэффициент  $K$  в этой формуле определяется только параметрами самого прибора: диаметрами трубки и шарика, расстоянием  $l$ , наклоном трубки к вертикали и ускорением свободного падения.

Формула (16) является основной рабочей формулой при измерении вязкости с помощью вискозиметра Гепплера. Напомним, что  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотности материала шарика и жидкости, соответственно. Они должны быть известны заранее. Коэффициент  $K$  обычно находят из формулы (16), на основе экспериментально измеренного времени движения шарика в жидкости с известным значением коэффициента вязкости. Такая процедура называется калибровкой прибора.

## Описание экспериментальной установки

Внешний вид лабораторного стенда для измерения температурной зависимости вязкости изображён на рис. 3. Основным элементом вискозиметра 1 является трубка 2, заполненная исследуемой жидкостью, в которой падает шарик 3. Для фиксации расстояния, проходимого шариком используются двойные кольцевые риски 4, нанесенные на трубке 2. Трубка 2 помещена в герметичную колбу 5, через которую непрерывно прокачивается прозрачная жидкость заданной температуры (термостатирующая жидкость, обычно – дистиллированная вода). Моменты времени, в которые шарик пересекает кольцевые риски 4, фиксируются с помощью секундомера 6. В термостате 7 имеется большая емкость с термостатирующей жидкостью, температура которой поддерживается автоматикой около заданного значения. Кроме того термостат обеспечивает постоянную прокачку термостатирующей жидкости через колбу 5. Термостатирующая жидкость подается в колбу 5 и откачивается из нее по

соединительным шлангом 8. Температура термостатирующей жидкости устанавливается и поддерживается около заданного значения с помощью блока 9.

При выполнении виртуальной лабораторной работы используется программа моделирующая работу лабораторного стенда. Внешний вид рабочего окна программы изображен на рисунке 4. В подписи к рисунку описано назначение кнопок.

В качестве исследуемой жидкости в работе можно выбрать водный раствор глицерина с содержанием глицерина 70%, 80% и 90% по массе. Температуру раствора можно задавать в диапазоне от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $70^{\circ}\text{C}$  с шагом  $10^{\circ}\text{C}$ .

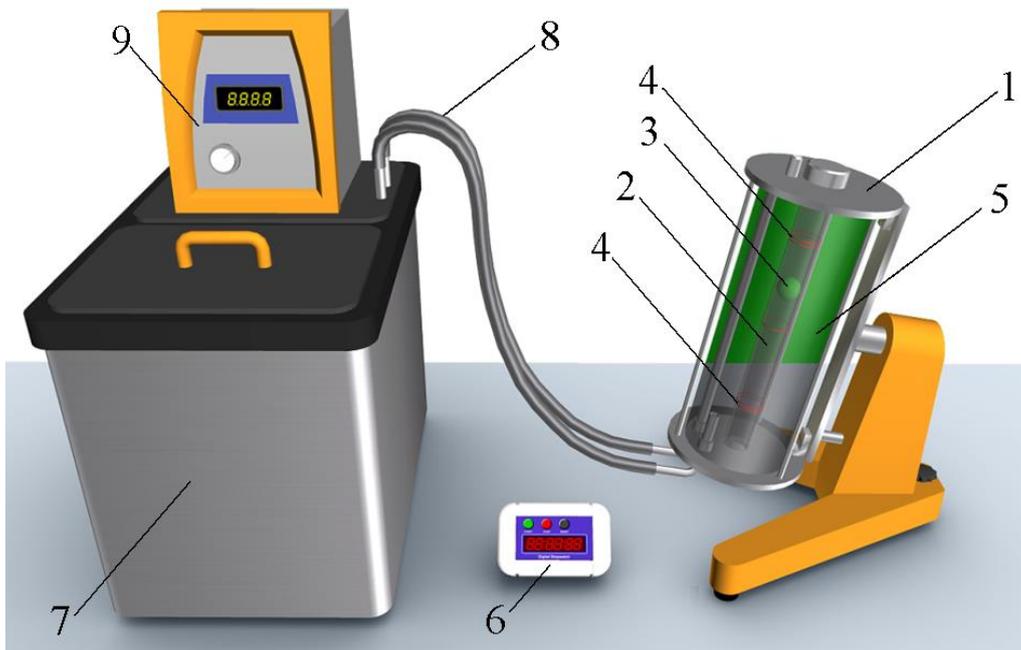


Рис. 3. Состав лабораторного стенда для измерения вязкости жидкости при разных температурах: 1) вискозиметр Гепшлера; 2) трубка с исследуемой жидкостью; 3) падающий шарик; 4) двойные кольцевые риски; 5) колба с термостатирующей жидкостью; 6) секундомер; 7) термостат; 8) соединительные шланги; 9) блок контроля температуры.

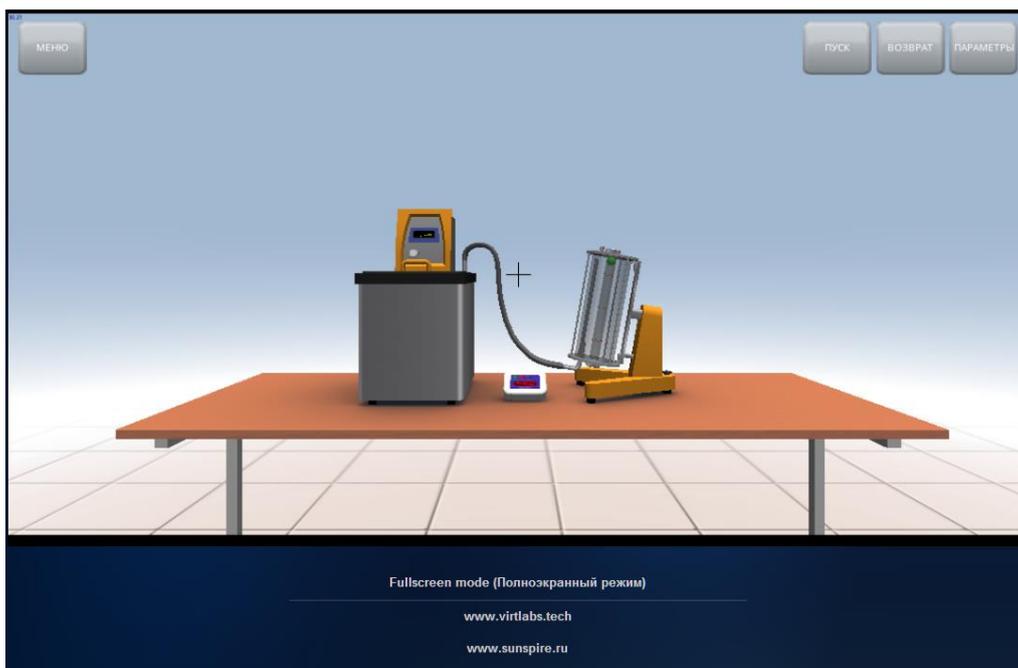


Рис. 4. Стартовое окно программы, моделирующей работу виртуального лабораторного стенда для измерения вязкости жидкости при разных температурах. Назначение кнопок: «МЕНЮ» активирует выпадающее меню с опциями «ИНФОРМАЦИЯ» (информация об установке) и «ВЫХОД»; «ПУСК» запускает движение шарика; «ВОЗВРАТ» возвращает шарик в начальное положение; «ПАРАМЕТРЫ» активирует выпадающее меню с опциями «ТЕМПЕРАТУРА» и «КОНЦЕНТРАЦИЯ», которые в свою очередь также являются выпадающими меню для выбора значений температуры исследуемого раствора и массовой доли глицерина в нём. Переход в полноэкранный режим работы происходит по нажатию соответствующей строчки в нижней части окна.

Измерения на установке можно производить с двумя разными шариками, плотности которых приведены в разделе «Справочные данные» (табл. 5). Более тяжелый второй шарик используется при проведении измерений с жидкостями, имеющими большую вязкость.

При проведении измерений фиксируются моменты времени прохождения центра шарика через середины промежутков между верхними и нижними парами кольцевых рисок (поз. 4 на рис.2). Измерение времени можно проводить как по секундомеру установки (поз. 6 на рис.2), так и любым внешним секундомером, например, секундомером мобильного телефона. При измерении секундомером установки для более точной фиксации моментов времени можно использовать фотографии экрана, полученные командой «Print Screen» компьютера.

### Порядок выполнения работы

1. Запустить виртуальный лабораторный стенд, выбрав раздел «Проведение измерений (2.18V)», после загрузки стартового окна запустить программу «нажав» кнопку «Запуск». Перейти в полноэкранный режим.
2. Провести калибровку вискозиметра с первым и вторым шариком. Для этого необходимо измерить время падения шарика в жидкости с известной вязкостью и на основе формулы (16) рассчитать константу  $K$  для установки с каждым из шариков. В случае первого шарика для калибровки используется раствор с содержанием глицерина 70% при температуре 20°C, в случае второго шарика – раствор с содержанием глицерина 90% при той же температуре. Для большей точности

результата измерения необходимо провести по три раза для каждого шарика и при расчете  $K$  использовать среднее значение времени падения. Результаты измерения моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  прохождения шариком верхних и нижних рисок, время падения  $t = t_2 - t_1$ , среднее время падения  $t_{cp}$ , известные значения  $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\rho_0$  (см. таблицы в разделе «Справочные данные») и найденные значения константы  $K$  заносятся в соответствующие ячейки таблицы 1. Значения  $K$  рассчитайте и запишите с четырьмя значащими цифрами. Обратите внимание на то, в каких единицах требуется записать эти значения в таблицу 1.

Таблица 1. Данные для калибровки вискозиметра. Значения константы  $K$ .

№ шара	массовая доля глицерина в р-ре	температура р-ра	$\eta$ , мПа·с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t$ , с	$t_{cp}$ , с	$K$ , $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2$
1	70%	20°C								
2	90%	20°C								

3. Измерить зависимость вязкости раствора с содержанием глицерина 80% в диапазоне от 20°C до 70°C с шагом 10°C. Номер используемого шара для каждой температуры указан в разделе «Справочные данные» (табл. 5). Данные измерений, константы необходимые для расчетов, и вычисленные значения вязкости занести в таблицу 2.

Таблица 2. Измеренная зависимость вязкости раствора глицерина (80%) от температуры.

температура р-ра, °C	№ шара	$K$ , $10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , с	$\eta$ , мПа·с	$\frac{1}{T}$ , $10^{-3} \text{ К}^{-1}$	$\ln\left(\frac{\eta}{\text{мПа} \cdot \text{с}}\right)$
20								
30								
40								
50								
60								
70								

4. Проверить выполнимость уравнения Андраде. Для этого по измерениям п.3 вычислить обратное значение абсолютной температуры  $\frac{1}{T}$  и величину  $\ln\left(\frac{\eta}{\text{мПа} \cdot \text{с}}\right)$ ; вычисленные значения занести в таблицу 2. Построить график зависимости  $\ln\left(\frac{\eta}{\text{мПа} \cdot \text{с}}\right)$  от обратной температуры  $\frac{1}{T}$ , убедиться в линейности графика. По методу наименьших квадратов рассчитать коэффициент  $a$  наклона этого графика и погрешность  $\Delta a$  коэффициента наклона.
5. По формула (5) и (7) найти энергию активации  $\varepsilon$  для одной молекулы и  $E_a$  для моля молекул. Исходя из погрешности  $\Delta a$ , рассчитать погрешности этих величин.

6. В качестве результатов работы представить:
- значение константы  $K$  для вискозиметра с первым и вторым шариком;
  - таблицу значений вязкости выбранного раствора в измеренном диапазоне температур;
  - график натурального логарифма вязкости от обратной температуры;
  - доверительные интервалы для энергий активации  $\epsilon$  и  $E_a$ .

### Справочные данные.

Таблица 3. Плотность  $\rho_0$  (в кг/м<sup>3</sup>) водных растворов глицерина в зависимости от массовой доли глицерина и температуры раствора. Погрешность значений плотности, приведенных в таблице,  $\Delta\rho_0 = 0.5$  кг/м<sup>3</sup>.

содержание глицерина, % по массе	температура раствора, °C					
	20	30	40	50	60	70
70	1180.7	1174.9	1169.2	1163.5	1158.0	1152.6
80	1207.9	1201.9	1195.9	1190.1	1184.4	1178.8
90	1234.9	1228.7	1222.6	1216.6	1210.7	1204.9

Таблица 4. Вязкость водного раствора глицерина при 20°C в зависимости от содержания глицерина.

% по массе	70	80	90
$\eta$ , мПа·с	23.09	60.86	223.8

Таблица 5. Номер шарика, используемого в установке при определении вязкости водного раствора глицерина в зависимости от массовой доли глицерина и температуры раствора. Плотности первого и второго шариков:  $\rho_1 = (2220 \pm 5)$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_2 = (8100 \pm 20)$  кг/м<sup>3</sup>, соответственно.

содержание глицерина, % по массе	температура раствора, °C					
	20	30	40	50	60	70
70	1	1	1	1	1	1
80	2	2	1	1	1	1
90	2	2	2	2	1	1

### Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость?
2. Какой режим течения жидкости называется ламинарным?
3. Перенос какой характеристики среды приводит к появлению вязкости?
4. Как действуют силы вязкого трения на границе двух слоев жидкости, которые движутся с разными скоростями?
5. Какими механизмами обусловлено возникновение силы внутреннего трения между двумя слоями жидкости, имеющими разную скорость?
6. Каков физический смысл коэффициента вязкости жидкости?
7. По какой формуле вычисляется сила вязкого трения между двумя слоями ньютоновской жидкости?
8. От чего зависит величина силы вязкого трения, действующая на участке площадью  $\Delta S$  границы между слоями?
9. Как называется основная единица вязкости в системе СИ?
10. Какая величина называется текучестью?

11. Как обычно ведет себя вязкость жидкости при повышении температуры?
12. Чем структура жидкости на молекулярном уровне отличается от структуры газов?
13. Почему коэффициент вязкости жидкости зависит от температуры?
14. Что такое энергия активации молекулы?
15. Что такое уравнение Андраде для температурной зависимости вязкости?
16. Как, опираясь на уравнение Андраде для коэффициента вязкости, можно найти энергию активации молекулы?
17. Какой вид имеет график зависимости натурального логарифма вязкости от обратной абсолютной температуры, если справедливо уравнение Андраде для вязкости?
18. Как называется прибор для измерения вязкости?
19. Какие силы действуют на шарик при его падении в безграничной жидкости?
20. Как вычисляется сила вязкого трения действующая на шарик в безграничной жидкости?
21. В чем заключается метод Гепплера определения коэффициента вязкости жидкости?
22. Зачем нужен наклон трубки в вискозиметре Гепплера?
23. Зачем нужна малость разности диаметров трубки и шарика в вискозиметре Гепплера?
24. Какой вид имеет основная формула расчета вязкости при ее измерении на вискозиметре Гепплера?
25. Что такое калибровка вискозиметра Гепплера?
26. У какого из двух шариков используемых в работе, установившаяся скорость падения в одной и той же жидкости будет больше?
27. Укажите основные элементы лабораторного стенда для измерения температурной зависимости вязкости.
28. Какие величины нужно знать для того, чтобы провести калибровку вискозиметра?
29. Как проверяется справедливость уравнения Андраде для исследуемой жидкости?
30. Как в работе вычисляется энергия активации молекул?
31. Во сколько раз энергия активации для моля больше, чем для одной молекулы?
32. Выведите формулы для расчета погрешностей энергии активации молекулы и моля?
33. Что должно быть представлено в качестве результатов работы?
34. Во сколько раз при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  вязкость водного раствора глицерина с содержанием 90% больше, чем вязкость раствора с содержанием глицерина 70%?
35. Как изменяется плотность исследуемых в работе водных растворов глицерина при увеличении температуру от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $70^{\circ}\text{C}$ ?
36. Во сколько раз плотность второго шарика, используемого в работе, больше плотности первого шарика?

### Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Лань, 2020.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1999 - 2000 .
3. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Метод. указания к лабораторным работам для студентов всех спец./ Под ред. В.А. Самолетова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003.