

Лабораторная работа № 10

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛ ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Познакомиться с явлением внутреннего трения в жидкостях, определить коэффициенты внутреннего трения жидкостей на лабораторной установке и методом компьютерного моделирования.

2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Работа выполняется двумя способами. Для выполнения работы первым способом необходимы следующие инструменты и комплектующие: стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, шарики различного диаметра, штангенциркуль, линейка. Для выполнения работы вторым способом методом компьютерного моделирования необходим компьютер и соответствующее программное обеспечение.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Жидкость является агрегатным состоянием вещества, промежуточным между газообразным и твердым. Жидкость имеет определенный объем и принимает форму сосуда. В жидкости существуют силы притяжения между молекулами, которые удерживают их на определенном расстоянии друг от друга. Расстояние между молекулами остается постоянным, поэтому жидкость обладает неизменным объемом и является несжимаемой. С повышением температуры жидкости частота колебательного движения резко увеличивается, возрастает подвижность молекул, и это приводит к уменьшению вязкости жидкости. Рассмотрим поток жидкости, скорость течения которого в разных местах различна. Такое состояние жидкости не является равновесным, и в ней будет происходить процесс, стремящийся вы-

ровнять скорость течения.

Свойство реальной жидкости – оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При таком перемещении одних слоев жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Такие процессы называют внутренним трением или вязкостью. **Вязкость – это мера внутреннего трения в жидкости.** Потеря внутренней энергии при движении жидкости пропорциональна вязкости. Это еще одно из свойств, которым обладает жидкость.

Рассмотрим жидкость, находящуюся между двумя горизонтальными плоскостями. В качестве реального примера рассмотрим лодку, плывущую со скоростью v_0 по озеру относительно дна (рис. 10.1). Глубина озера h . Пространство между лодкой и дном заполнено жидкостью, которая имеет некоторую вязкость. Между поверхностью твердого тела и жидкостью всегда существуют силы взаимного молекулярного сцепления, наличие которых приводит к тому, что слой жидкости, непосредственно прилегающий к дну лодки, полностью увлекается дном лодки, как бы «прилипая» к ней. Это приводит к замедлению

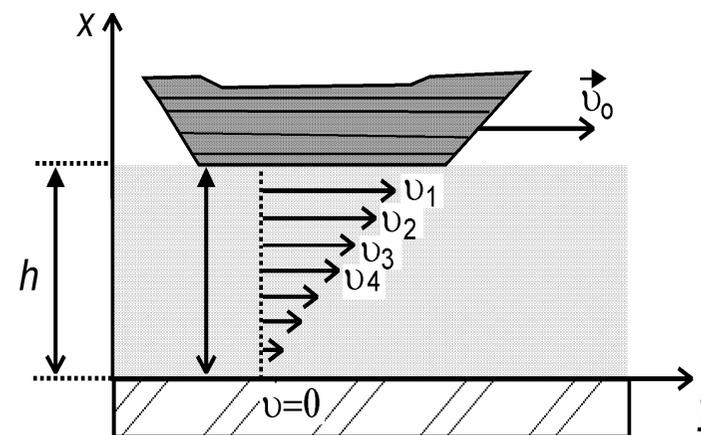


Рис. 10.1

движения и, как следствие, некоторой силы трения, препятствующей движению. Между текущими слоями жидкости происходит то же самое.

Таким образом, верхние слои жидкости, находящиеся вблизи дна лодки (рис. 10.1), будут двигаться со скоростью v_0 . Чем ближе к дну, тем скорость слоев жидкости становится меньше. Нижние слои жидкости покоятся, и их скорость равна нулю.

В промежутке между дном лодки и дном озера скорость v_x меняется по линейному закону

$$v_x = \frac{v_0}{h} x, \quad (10.1)$$

где h – расстояние от дна озера.

Опыт показал, что сила внутреннего трения F , действующая между слоями, пропорциональна величине площади S , соприкасающихся слоев и градиенту скорости $\frac{dv}{dX}$ движения слоев (градиент скорости задает изменение скорости v на единицу длины X в направлении, перпендикулярном скорости). Тогда сила внутреннего трения F равна

$$F = -\eta S \frac{dv}{dX}, \quad (10.2)$$

где η – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом внутреннего трения среды. Из формулы (10.2) можно выразить коэффициент внутреннего трения

$$\eta = -\frac{F}{S \frac{dv}{dX}}.$$

Согласно этому выражению можно дать определение ко-

эффициента внутреннего трения. Коэффициент внутреннего трения есть физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, возникающей при движении слоя единичной площади при градиенте скорости, равном единице.

В современной Международной системе единиц (СИ) коэффициент вязкости η имеет единицу измерения

$$[\eta] = \left[\frac{H}{\frac{M^2}{C \cdot M}} \right] = \left[\frac{КГ \cdot М \cdot С}{С^2 \cdot М^2} \right] = \left[\frac{КГ}{С \cdot М} \right] = [Па \cdot с].$$

В табл. 10.1 приведены значения коэффициентов вязкости для некоторых веществ. Видна огромная разница значений вязкости воздуха, воды и других жидкостей. Следует обратить также внимание на температурную зависимость вязкости воды. По мере повышения температуры вязкость снижается. Следует отметить, что вязкость воздуха не сильно меняется с температурой, но при **увеличении** температуры вязкость все же растет.

Таблица 10.1

Коэффициент вязкости η [10^{-6} , Па·с] при разных температурах для разных веществ

Вещество	Температура, °С					
	0	20	40	60	80	100
Вода	1790	1010	660	470	360	280
Воздух	17	18	19	20	21	22
Ртуть	168	155	144	135	128	121
Масло техническое при 20° С $\eta = 70000 - 300000$ Па·с						
Мед при 20°С $\eta = 150000$ Па·с						

С другой стороны, у большинства жидкостей вязкость с ростом температуры **уменьшается**. Например, вязкость обычного технического масла при низкой температуре велика. Это затрудняет запуск машины. Когда мотор горячий, вязкость масла уменьшается, что приводит к меньшей защите двигателя как раз тогда, когда он в этом больше всего нуждается. Поэтому изготавливаемые в настоящее время масла выпускаются с различными компонентами, так чтобы суммарный эффект был противоположным.

Характер изменения коэффициента вязкости от температуры сильно зависит от того, в каком агрегатном состоянии находится вещество: газообразном, жидком или твердом. Так, в жидкостях коэффициент вязкости уменьшается с ростом температуры, а в твердых телах – увеличивается.

Ламинарное течение хорошо наблюдается при небольшом значении скорости потока вязкой жидкости.

Рассмотрим механизм переноса количества движения в жидкости в случае **ламинарного** («слоистого») течения, которое характеризуется упорядоченным и плавным движением. При ламинарном течении каждая частица жидкости движется по определенной траектории, и вся картина течения представляет собой как бы движение различных слоев жидкости с различными скоростями друг относительно друга. Такой характер жидкости сохраняется в определенном интервале скоростей течения. С увеличением скорости движение частиц становится все более беспорядочным.

При **ламинарном течении** перенос импульса в потоке от слоя к слою осуществляется молекулярным механизмом – независимыми изменениями импульса отдельных частиц газа или жидкости.

С увеличением скорости потока и с увеличением перепада давления на концах трубы течение принципиально меняет свой характер: вместо слоистого течения наблюдается **турбулентное** или **завихренное** течение.

При **турбулентном течении** передача импульса от слоя к слою является процессом коллективным. Это можно выразить словами: **индивидуальное, неорганизованное движение при ламинарном течении сменяется при переходе к турбулентному течению коллективным и, следовательно, более высокоорганизованным сопротивлением**. Это выражается в том, что коэффициент турбулентной вязкости много больше соответствующего коэффициента вязкости при ламинарном потоке.

Наглядное отличие ламинарного течения от турбулентного в природе проявляется в следующих явлениях. При медленном течении реки и при движении жидкости в трубах большого диаметра наблюдается ламинарное течение. В том случае, когда частицы жидкости двигаются по запутанным, извилистым траекториям, реализуется турбулентное движение. Следует отметить, что при турбулентном течении жидкости перенос количества движения не связан с вязкостью жидкости.

Проведем вычисления силы сопротивления некоторого тела с небольшой скоростью, при которой перемещение слоев жидкости под действием его движения является ламинарным. В этом случае из-за вязкости жидкости возникает сила сопротивления, препятствующая движению этого тела.

Сила сопротивления, как уже было отмечено ранее Д. Стоксом, пропорциональна в этом случае первой степени скорости:

$$F_{\text{сопр}} = C v,$$

где C – коэффициент сопротивления и зависит от вязкости жидкости, размеров и формы тела. Для движущегося тела сферической формы (шарик) Стокс теоретически рассчитал значение коэффициента сопротивления C и получил:

$$C = 6 \pi r \eta,$$

где r – радиус шарика. Следовательно, сила сопротивления среды для шарика определяется формулой

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi r \eta v,$$

где v – скорость движения шарика.

Д. Стоксом был разработан метод для определения коэффициента внутреннего трения η . Суть метода Стокса заключается в следующем. Если взять небольшой шарик радиусом r , изготовленный из материала плотностью ρ_0 , и уронить в жидкость плотностью ρ , коэффициент внутреннего трения которой η (рис. 10.2), то на него будут действовать три силы:

1) сила тяжести $P = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho_0 \cdot g$;

2) выталкивающая архимедова сила

$$F_{\text{выт.}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho \cdot g;$$

3) сила сопротивления жидкости

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi r \eta v.$$

Можно записать уравнение движения шарика в жидкости с учетом действующих на него сил (рис. 10.2) следующим образом:

$$ma = P - F_{\text{выт.}} - F_{\text{сопр.}},$$

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_0 - \rho) g - 6\pi r \cdot \eta \cdot v, \quad (10.3)$$

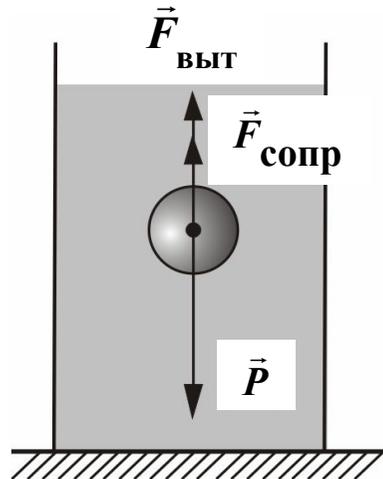


Рис. 10.2. Вид установки для определения коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

где m – масса шарика.

В начале своего движения шарик движется ускоренно, но по мере роста скорости шарика растет и сила сопротивления жидкости.

В некоторый момент времени равнодействующая сил, действующая на шарик, станет равной нулю, то есть шарик начнет двигаться с некоторой постоянной скоростью v . Тогда из уравнения (10.3) можно получить формулу для подсчета коэффициента внутреннего трения:

$$\frac{3}{4} \pi r^3 (\rho_0 - \rho) g = 6\pi r \cdot \eta \cdot v_0.$$

Из этого уравнения выразим η :

$$\eta = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_0 - \rho) g}{6\pi r \cdot v_0} = \frac{d^2 (\rho_0 - \rho) g t}{18h},$$

$$\eta = \frac{d^2 (\rho_0 - \rho) g t}{18h}. \quad (10.4)$$

Уравнение (10.4) справедливо для случая падения шарика в безграничной среде. В случае, когда шарик падает вдоль оси диаметра D , необходимо учитывать влияние боковых стенок. С учетом поправки на влияние боковых стенок уравнение (10.4) принимает вид:

$$\eta = \frac{d^2 (\rho_0 - \rho) g t}{18h(1 + 2,4 \frac{d}{D})}, \quad (10.5)$$

где d – диаметр шарика; D – диаметр колбы; h – высота падения шарика в жидкости; t – время падения шарика; g – ускорение свободного падения.

Вывод формулы для коэффициента вязкости (для любознательных студентов)

Рассмотрим силы, действующие на маленький элемент жидкости, который вовлекается в поток из первоначального неподвижного состояния. Движущая сила равна произведению площади поперечного сечения этого элемента на разность давлений на его концах ΔP . Сила трения уменьшает эффект действия движущей силы. Проведем вычисление сдвигового напряжения в небольшом элементе жидкости. При этом расчете сделаем допущение, что под действием силы, приложенной к верхней части выбранного элемента жидкости, ее слои сдвигаются друг относительно друга, причем величина смещений слоев тем больше, чем дальше отстоит слой от нижнего элемента (рис. 10.3) При этом боковые стороны выбранного элемента жидкости отклоняются на некоторый угол γ . Будем считать, что в этом элементе действие силы $F_{||}$ равномерно распределено по всей площади его верхнего основания. Тогда величину напряжения можно считать равной отношению всей внешней силы $F_{||}$ к площади основания элемента жидкости S

$$\tau = \frac{F_{||}}{S}. \quad (10.6)$$

Сдвиговое напряжение пропорционально угловой деформации

$$\frac{F_{||}}{S} \sim \operatorname{tg} \gamma, \quad (10.7)$$

тогда из геометрического построения на рис. 10.3 следует

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta x}{L}, \quad (10.8)$$

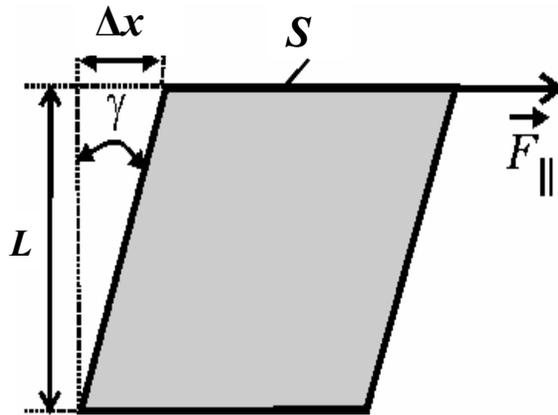


Рис. 10.3

где x – абсолютный сдвиг верхней грани элемента жидкости по отношению к нижней; L – высота элемента жидкости. При небольшой величине смещения верхних слоев величина угла γ мала, и $\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma$. Тогда уравнение (10.8) принимает вид

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L}. \quad (10.9)$$

Разделим обе части уравнения (10.9) на Δt – время действия силы $F_{||}$

$$\frac{1}{L} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\gamma}{\Delta t}. \quad (10.10)$$

Учитывая, что $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, (10.11)

получим

$$\frac{v}{L} = \frac{\gamma}{\Delta t}. \quad (10.12)$$

Для простых жидкостей скорость изменения сдвиговой деформации $\frac{\gamma}{\Delta t}$ пропорциональна сдвиговому напряжению

$$\frac{F_{||}}{S} = \eta \frac{\gamma}{\Delta t}. \quad (10.13)$$

Здесь η является коэффициентом пропорциональности между напряжением сдвига и скоростью деформации. Коэффициент η называют **коэффициентом вязкости жидкости**. Учитывая, что площадь $S = L^2$, и равенство (10.12), из выражения (10.13) полную силу вязкого трения можно представить в следующем виде:

$$F_{||} = \eta \left(\frac{v}{L} \right) S = \eta \left(\frac{v}{L} \right) L^2 = \eta v L. \quad (10.14)$$

При выводе этих соотношений учитывалось, что сила сопротивления вязкости равна произведению этого напряжения на площадь поперечного сечения выделенного элемента. Использовалось также предположение, что этот элемент представляет собой куб со стороной L (рис. 10.4). Тогда равнодействующая всех сил, действующих на кубик размерами L и массой m , определяет его ускорение a , и согласно второму закону Ньютона $F = am$ и с учетом равнодействующих сил

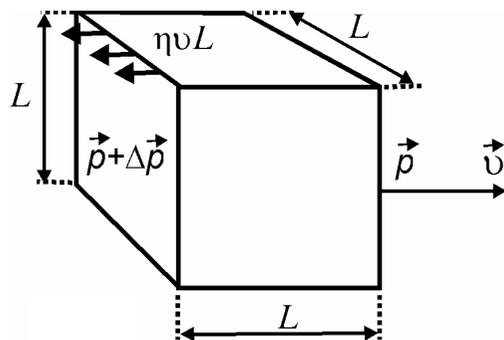


Рис. 10.4

$$F = L^2 \Delta P - F_{II} ,$$

$$L^2 \Delta P - \eta v L = am .$$

Здесь $L^2 \Delta P$ – движущая сила, L^2 – площадь поперечного сечения выделенного элемента, ΔP – разность давлений на концах выделенного элемента. Примем во внимание то, что масса кубика равна

$$m = \rho V = \rho L^3 ,$$

где ρ – плотность жидкости. Ускорение a определяется выражением $a = \Delta v / \Delta t$. Поскольку движение кубика начинается из состояния покоя, то Δv равно v

$$am \approx (\rho L^3 \cdot v) \frac{v}{L} = \rho L^2 \cdot v^2 .$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1. Порядок выполнения работы на приборе

Описание установки.

Установка для определения коэффициента вязкости состоит из стеклянного цилиндра, диаметр r_v много больше диаметра шарика и наполненного исследуемой жидкостью (рис. 10.2). На стенке цилиндра нанесены две метки, причем верхняя метка несколько ниже уровня жидкости, чтобы до ее достижения шарик уже двигался равномерно.

Последовательность выполнения работы на приборе

1. Измерьте диаметр шарика.
2. Опустите шарик в жидкость как можно ближе к оси цилиндра. В момент прохождения шариком верхней метки включите секундомер, который останавливают при достижении шариком нижней части цилиндра.
3. Измерьте высоту падения шарика линейкой.
4. Опыт повторите 5–7 раз с шариками различных диаметров.
5. Полученные данные из проведенного опыта занесите в таблицу.
6. Проведите расчет коэффициента внутреннего трения по формуле (10.14).
7. Проведите расчет погрешности коэффициента внутрен

него трения по формуле $\Delta \eta = \eta \left(\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta h}{h} \right)$,

где Δh , Δt , Δd – погрешности измерения указанных величин.

Табличные данные

$$\rho_{\text{СТАЛЬ}} = 7820 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; \quad \rho_{\text{ГЛИЦЕРИН}} = 1200 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; \quad \rho_{\text{ВОДА}} = 1000 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3};$$

$$\rho_{\text{РАСТ.МАСЛО}} = 900 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; g = 9,8 \frac{\text{М}}{\text{С}^2}.$$

4.2. Порядок выполнения работы на компьютере

Для того чтобы выполнить задания виртуальной физической лабораторной работы, необходимо запустить программу, щелкнув левой клавишей мышки по ярлыку на экране «Физ. лаб.». После этого на экране появится окно, в котором будет дан список лабораторных работ. Установить курсор на работе «Изучение движения тел при наличии сил вязкого трения» и мышкой активизировать работу программы. В результате откроется окно, в котором будет таблица с командами:

- О работе
- Ход работы
- Эксперимент

Последовательно вызывая пункты меню в таблице, необходимо предварительно ознакомиться с лабораторной работой и порядком ее выполнения.

После обращения к команде «Эксперимент» на экране появится заставка для выбора вещества, в котором будет имитироваться падение шарика.

После активизации команды «Условия заданы» на экране устанавливается рабочее поле, имитирующее емкость с жидкостью, шарик, горизонтальные метки и шкала для отсчета пройденного пути шариком во время падения, рабочие окошки для определения сопротивления движению шарика в жидкости: задание диаметра шарика, секундомер и табличные данные (рис. 10.5).

Эксперимент. В этой части работы на компьютере моделируется падение тела в жидкой среде или в газе. В ходе эксперимента нужно определить вязкости исследуемых веществ.

Последовательность выполнения работы на компьютере

1. Выбрать вещество. Для выбора вещества на окне с его названием нужно нажать левую кнопку мыши. Появится список возможных вариантов. Из этого списка, например, можно выбрать растительное масло, при этом его плотность и вязкость отобразятся в окне «Начальные условия». Дело в том, что вязкость этого вещества такова, что для него сравнительно легко проследить за установлением скорости. Выбрав рабочее вещество, нажмите кнопку «Условия заданы».

2. Для выбранного вещества найти зависимость пройденного пути от времени. Следует нижнюю метку поставить в положение 1 см, затем нажать кнопку «Новое измерение». Записать время, за которое шарик прошел это расстояние, переместить данную метку вниз (шаг 1 см) и повторить опыт и т. д. Прodelать опыт для трех диаметров шарика (лучше взять 1, 2

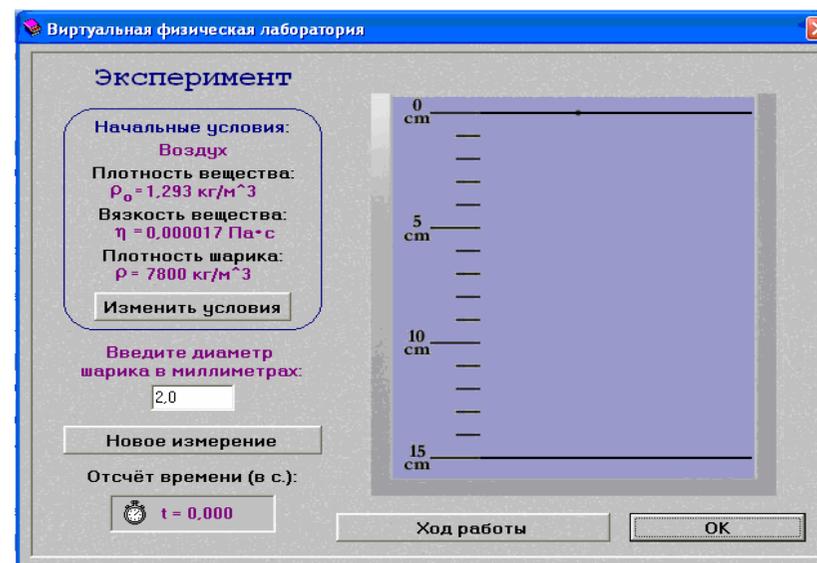


Рис. 10.5

и 4 мм) для всех веществ. Напоминаем, что диаметр устанавливается путем введения числа в соответствующее окно.

3. Построить графики зависимости пути от времени для разных диаметров шарика для воды, растительного масла и глицерина. Масштаб на осях выбрать таким, чтобы график занимал всю площадь листа.

4. Выбрать вещество, например глицерин. Установить планку 15 см, выбрать диаметр шарика, например 2 см. Зафиксировать время падения шарика. Опыт проделать для всех веществ. Построить график зависимости времени падения от вязкости вещества для одного размера шарика. Данные о вязкости веществ приведены в начальных условиях на экране компьютера.

5. Определить вязкость веществ при помощи расчета коэффициента внутреннего трения по формуле (10.4). Для этого поставьте верхнюю метку на некотором расстоянии (около 3 см) от уровня жидкости, чтобы на этом участке успело установиться равномерное движение шарика. Бросьте шарик в жидкость, измерьте время падения шарика при равномерном движении и определите путь, пройденный им до нижней метки, находящейся на уровне 15 см. Проведите этот опыт с тремя шариками разных диаметров (например, 0,5, 1 и 2 мм). Полученные результаты сравните с табличными.

6. Результаты эксперимента и расчета коэффициента вязкости η и погрешности ошибки эксперимента абсолютной $\Delta\eta$ и относительной $\frac{\Delta\eta}{\eta} 100\%$ занесите в табл. 10.2.

Внимание. Следует обратить внимание на график зависимости пройденного пути от времени для исследуемых веществ. Если на графике не будет участка, соответствующего прямой линии, то вязкость данной жидкости таким методом определить нельзя.

Таблица 10.2

№ п/п	Диаметр шарика d , м	Высота h , м	Время t , с	Коэффиц-т вязкости η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	$\frac{\Delta\eta}{\eta} 100\%$
1						
2						
3						

Контрольные вопросы и задания

1. Какие силы действуют на тело, погруженное в жидкость?
2. Чему равна тормозящая сила?
3. Какой процесс называют внутренним трением или вязкостью?
4. Каков механизм переноса количества движения в этом процессе?
5. От чего зависит сила внутреннего трения жидкости?
6. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения?
7. Какое течение жидкости называют ламинарным, турбулентным?
8. Почему коэффициент турбулентной вязкости много больше соответствующего коэффициента вязкости при ламинарном потоке?
9. Почему в современные масла в двигателях автомобиля добавляют дополнительные компоненты?
10. В чем заключается метод Стокса для определения коэффициента внутреннего трения?
11. Вывести размерность η в единицах СИ.
12. Что характеризуют величины Δh , Δt , Δd и как их можно определить?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т.И. Курс физики (учебное пособие для технических специальностей ВУЗов)/Т.И. Трофимова. – М: Издательский центр «Академия», 2007, 2008. – 560 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин, Я.В. Общий курс физики. Т.1./Я.В. Сивухин. – М.: Наука. 1979. – 519 с.
2. Суорц, Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т.1./Кл. Э. Суорц. – М.:Наука. 1986. – 400 с.

Лабораторная работа № 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДОГО ТЕЛА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с основами теории упругих деформаций твердых тел. Провести расчет модуля Юнга при растяжении проволоки и модуля сдвига, используя метод крутильных колебаний.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Прибор Лермантова, унифилярный подвес ФПМ-05, штангенциркуль, линейка, секундомер.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Понятие деформации

Все реальные твердые тела деформируемы, т. е. под действием приложенных сил они меняют свою форму и размеры. **Деформация** – это изменение формы твердого тела под действием силы. При деформации изменяется расстояние между точками тела. Простейшие виды деформации: **растяжение, сдвиг, кручение, изгиб.**

При деформации твердых тел различают два предельных случая: деформации упругие и деформации неупругие (пластические). **Упругими** называют деформации, исчезающие после прекращения действия приложенных сил. Так, упруго растянутая или сжатая пружина принимает свою прежнюю длину после прекращения действия растягивающей силы. **Пластическими, или остаточными,** называют такие деформации, которые сохраняются в теле, по крайней мере частично, после прекращения действия внешних приложенных сил. На пластических деформациях основана холодная обработка металлов – штамповка, ковка, волочение и т. п.