

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»
Кафедра инженерной физики

О.В. Пышненко, А.А. Яхновец, В.П. Богданова

Механика. Молекулярная физика и термодинамика

*Рабочая тетрадь
для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Физика»
студентами факультета
химико-биологических и географических наук*

*Витебск
ВГУ имени П.М. Машерова
2022*

УДК 531(075.8)+539.19(075.8)

ББК 22.2я73+22.36я73

П95

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 3 от 03.03.2015 г.

Авторы: доцент кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **О.В. Пышненко**; старший преподаватель кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **А.А. Яхновец**; лаборант кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **В.П. Богданова**

Р е ц е н з е н т :

профессор кафедры геометрии и математического анализа
ВГУ имени П.М. Машерова,
доктор физико-математических наук *Ю.В. Трубников*

Пышненко, О.В.

П95 Механика. Молекулярная физика и термодинамика : рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентами факультета химико-биологических и географических наук / О.В. Пышненко, А.А. Яхновец, В.П. Богданова. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2022. – 56 с.

Рабочая тетрадь написана в соответствии с учебной программой по физике для специальностей: 1-31 01 01 01-02 «Биология», 1-33 01 01 «Биоэкология» и 1-02 04 04-01 «Биология. Химия». Содержит теорию, методику выполнения, контрольные вопросы защиты лабораторных работ, справочный материал и список литературы.

Учебное издание предназначено для изучения теоретического материала и отработки практических навыков при изучении дисциплины «Физика».

УДК 531(075.8)+539.19(075.8)

ББК 22.2я73+22.36я73

© Пышненко О.В., Яхновец А.А., Богданова В.П., 2022

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2022

Содержание

Сводная таблица учета выполнения и защиты лабораторных работ	4
Инструкция по охране труда для студентов, занимающихся в физических лабораториях	5
Методы вычисления погрешностей	8
Раздел 1. Механика	10
Лабораторная работа № 1. Определение линейных размеров и объемов тел правильной формы, оценка погрешностей измерений	10
Лабораторная работа № 2. Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда	13
Лабораторная работа № 3. Проверка закона сохранения механической энергии	21
Лабораторная работа № 4. Изучение температурной зависимости коэффициента вязкости жидкости с помощью капиллярного вискозиметра .	26
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	30
Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика	34
Лабораторная работа № 6. Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца	34
Лабораторная работа № 7. Определение размеров молекул касторового масла	40
Лабораторная работа № 8. Определение теплоемкости твердых тел	46
Приложения	52
Приложение 1. Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц	52
Приложение 2. Основные физические константы в СИ	53
Приложение 3. Связь между различными системами измерения	53
Литература	55

**Сводная таблица
учета выполнения и защиты лабораторных работ**

студента _____ группы _____ курса _____ факультета

(Ф. И. О. студента)

№ л/р	Название лабораторной работы	Дата выполнения	Роспись преподавателя о выполнении и оформлении л/р	Роспись преподавателя о защите л/р
1	Определение линейных размеров и объемов тел правильной формы, оценка погрешностей измерений			
2	Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда			
3	Проверка закона сохранения механической энергии			
4	Изучение температурной зависимости коэффициента вязкости жидкости с помощью капиллярного вискозиметра			
5	Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса			
6	Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца			
7	Определение размеров молекул касторового масла			
8	Определение теплоемкости твердых тел			

Инструкция по охране труда для студентов, занимающихся в физических лабораториях

I. Общие требования безопасности

1.1. К работе в физических лабораториях допускаются студенты, которые получили инструктаж преподавателя и хорошо усвоили требования безопасности. Студенты должны выполнять работу только в присутствии проводящего занятия преподавателя или лаборанта и только под его руководством.

1.2. Допуск посторонних лиц в лабораторию физики в момент проведения занятий разрешается только преподавателем физики.

1.3. Соблюдение требований настоящей инструкции обязательно для студентов, работающих в лаборатории физики.

1.4. Во время проведения работы на студентов могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы:

- колющие и режущие инструменты;
- высокая температура;
- электрическое напряжение;
- ионизирующие излучения;
- лазерное излучение;
- химические вещества;
- поля высокой напряженности;
- возможен взрыв вакуумных приборов или приборов, находящихся под давлением.

**ПОМНИТЕ, ЧТО ОПАСНО ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ И ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА
НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЛЮБОЙ ВЕЛИЧИНЫ, ЕСЛИ
НЕ СОБЛЮДАТЬ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ.**

1.5. При обнаружении каких-либо неисправностей в приборах электросети, поврежденной лабораторной посуде, электроизоляции проводов надо прекратить работу, отключить электросеть и предупредить преподавателя.

1.6. В случае получения травмы, плохом самочувствии студенты должны сообщить об этом преподавателю.

1.7. Во время работы в лаборатории необходимо проявлять осторожность, соблюдать порядок и гигиену на рабочем месте. Нельзя класть продукты на рабочие столы.

1.8. Поспешность и небрежность в работе, нарушение или невыполнение требований данной инструкции могут привести к несчастному случаю, травме.

II. Требования безопасности перед началом работы

Перед началом работы студент обязан:

2.1. Изучить по пособию последовательность проведения работы.

2.2. Убедиться (при внешнем осмотре), что все приборы, провода, клеммы, защитное заземление находятся в исправном состоянии; Эксплуатация оборудования с неисправными сетевыми вилками, без защитного заземления, без крышек корпуса и т.п. запрещается.

2.3. Изучить опасные факторы, возникающие при проведении работ в лаборатории и способы их предупреждения.

2.4. Освободить рабочие места от всех ненужных для работы предметов.

2.5. Ознакомиться с оборудованием и методическими рекомендациями по выполнению предстоящей работы.

2.6. Соблюдать образцовую дисциплину и тишину, не заниматься ничем посторонним.

2.7. Выполнять все требования преподавателя и лаборанта, вытекающие из хода учебного процесса. Бережно относиться к оборудованию, инструментам, приспособлениям и прочим учебным пособиям.

III. Требования безопасности при выполнении работы

При выполнении работы студент сталкивается со следующими видами работ:

1. Монтаж лабораторных установок.
2. Демонстрация физических экспериментов.
3. Работа с химическими веществами.
4. Научно-исследовательская работа.
5. Работа с лазером.
6. Пайка и электромонтажные работы.
7. Работа на ПЭВМ.
8. Вспомогательные работы.

При выполнении всех видов работ студент обязан соблюдать меры безопасности, оговоренные ниже.

1. При подготовке оборудования к работе необходимо проверить его исправность. Ввод в действие новых приборов произвести согласно инструкции по эксплуатации. Эксплуатация приборов, имеющих знак "!", разрешается только после детального ознакомления с инструкцией по эксплуатации. В ходе работы избегать перегрузок приборов и следить за их исправностью. Приборы, имеющие клеммы, обозначенные знаком "⊥" должны быть заземлены.

2. При монтаже лабораторных установок оборудование располагать согласно схеме. Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание, уясните ход выполнения, выясните наиболее опасные места установки, изучите правила безопасного проведения. Соединительные провода должны иметь исправную изоляцию. Сборку электрических цепей, монтаж и ремонт электрических устройств производить только при отключенном источнике питания. Не включать источники электропитания без проверки цепей преподавателем или лаборантом.

3. Проверять наличие напряжения на источнике питания или других частях электроустановки разрешается с помощью измерителя напряжения. При сборке электрической цепи провода располагать аккуратно, а концы плотно зажимать клеммами.

4. Наблюдения, измерения и опыты производить, соблюдая осторожность, для того чтобы:

- случайно не прикоснуться к оголенным проводам или токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- избежать поражения осколками стекла в результате возможного взрыва при работе с вакуумными приборами или приборами, находящимися под давлением;
- предотвратить утечку химических, радиоактивных и огнеопасных веществ;
- свести к минимуму ионизирующее и лазерное облучение, действие электрических и магнитных полей на людей.

5. При проведении демонстрационных опытов необходимо выполнять все требования п. 2-5. Опыты должны отвечать требованиям пожарной безопасности. Пути эвакуации людей должны быть свободными, их не должны пересекать никакие проводящие шнуры, проходы должны быть свободны от оборудования, мебели и одежды. Запрещается держать на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении задания. Число студентов не должно превышать число оборудованных мест.

6. При работе с химическими веществами необходимо соблюдать правила:

- Работы с ядовитыми, едкими и т.п. веществами проводить в вытяжном шкафу, надев спецодежду, исключив попадание веществ на кожу, слизистые оболочки или внутрь организма.
 - По окончании работ тщательно вымыть руки. Запрещается выливать ядовитые вещества (например, ртуть) в канализационную сеть. Их необходимо сдавать лаборантам по окончании работы.
7. При проведении научно-исследовательской работы необходимо соблюдать п.п. 1-11 настоящей инструкции. Работать на специальном оборудовании можно только тщательно изучив инструкцию по эксплуатации, технике безопасности и получив допуск к работе от ответственного за технику безопасности в лаборатории.
8. При работе с лазером следует располагать лазер и облучаемые объекты так, чтобы избежать попадания прямого, отраженного или преломленного луча в глаза или на незащищенные участки кожи.
9. При проведении пайки эл. паяльником свинцовосодержащими припоями необходимо помнить, что свинец относится к сильнотоксичным веществам. Поэтому пайку лучше проводить в помещении, оборудованном вытяжной вентиляцией, а при невыполнении этого условия чаще проветривать помещение. При пайке необходимо избегать ожогов паяльником или каплями припоя. По окончании работ необходимо убрать припой в место исключаящее испарение свинца (плотно закрывающаяся коробка) и тщательно вымыть руки.
10. При работе на ПЭВМ необходимо соблюдать правила гигиены зрения и эл. безопасности. Запрещается работать у монитора без перерыва более 2 часов. Периодически необходимо делать перерывы в работе для отдыха глаз.
11. При выполнении вспомогательных работ необходимо получить дополнительный инструктаж по ТБ, соответственно с видом работ. Например, ТБ при переноске приборов, при подготовке к зимнему сезону и т.п.

СТУДЕНТАМ ЗАПРЕЩАЕТСЯ

- Включать в розетку собранную по схеме электрическую цепь без разрешения преподавателя или лаборанта. В случае необходимости каких-либо присоединений в цепи, включать ее можно вторично после просмотра преподавателем или лаборантом.
- Переносить приборы без разрешения преподавателя с одного стола на другой.
- Включать и выключать рубильники группового щита (за исключением оказания помощи пострадавшему от электрического тока).
- Делать какие-либо переключения в схеме при включенном напряжении.
- Касаться руками неизолированных проводов и зажимов в схеме, находящейся в данный момент под напряжением.
- Снимать или перевешивать запрещающие или предупреждающие плакаты.
- Категорически запрещается гасить горящую электропроводку находящуюся под напряжением химически пенным огнетушителем ОХП.
- При попадании человека под напряжение немедленно обесточить всю лабораторию (в каждой учебной лаборатории физического факультета установлены УЗО-ОШИ, которые обеспечивают отключение всей лаборатории от электрического тока).
- Если по каким-то причинам не удалось отключить электрическую сеть, то необходимо оттащить пострадавшего за одежду в сторону от устройства, находящегося под напряжением.
- При возникновении аварийной ситуации строго выполнять все указания руководителя, проводящего занятия.

IV. Требования безопасности в аварийных ситуациях

К аварийным ситуациям могут привести:

- отсутствие должной организованности, требовательности и контроля за состоянием охраны труда;
- несоответствие нормам и правилам ТБ рабочих мест и оборудования, на котором работают;
- несоблюдение правил ТБ или их незнание;
- работа на неисправном оборудовании, работа без защитных средств.

При возникновении аварийных ситуаций студент должен немедленно отключить электропитание, воду, газ и сообщить об этом преподавателю или лаборанту, оказать помощь пострадавшему в соответствии с инструкцией №2 по оказанию первой помощи, при необходимости принять меры по срочной эвакуации. После чего, под руководством ответственных лиц, должны быть приняты меры по устранению аварии и ее последствий с привлечением соответствующих служб.

V. Требования безопасности по окончании работы

По окончании работы необходимо проверить оборудование, о неисправных приборах сообщить лаборанту или преподавателю. Сдать химические реактивы, радиоактивные препараты лаборанту. Дождаться пока нагревающиеся приборы (паяльники, муфельные печи и т.п.) остынут до безопасной температуры. Перед уходом выключить электропитание, воду.

Методы вычисления погрешностей

Никакое измерение не дает истинного значения определяемой величины. Всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой, или погрешностью. Поэтому недостаточно знать только результат измерения, необходимо еще определить величину допущенной погрешности. Погрешности делятся на *систематические и случайные*.

Систематические ошибки возникают из-за неисправности или несовершенства измерительных приборов. Например, из-за смещения нуля измерительных приборов (амперметра, вольтметра и др.) все отсчеты будут искажены. Такие недостатки приборов изменяют результат измерений всегда в одну сторону, или увеличивая, или уменьшая его.

Систематические ошибки могут быть допущены также в процессе работы, если теория опыта недостаточно разработана и не учтены все причины, влияющие на точность измерений. Например, при определении сопротивления проводников, растворов не учтена поправка на температуру и т.д.

Систематические ошибки могут быть значительно уменьшены при более тщательном изучении приборов и устранения их недостатков, при более подробной разработке теории опыта и введении поправочных коэффициентов в результат измерений. Характерно, что увеличение числа измерений не уменьшит систематических ошибок.

Случайные ошибки вызываются неточностью отсчета, которую невольно допускает каждый экспериментатор. Например, недостаток органов зрения, органов слуха, реакции включения и выключения приборов отсчета времени и т.д.

В отличие от систематических случайные ошибки могут изменять результат измерений в обе стороны, т.е. увеличивать или уменьшать его. Поэтому для уменьшения влияния случайных ошибок необходимо всякое измерение проводить несколько раз ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$).

Случайные ошибки подчиняются законам вероятности. Это значит, если при

каком-либо измерении получится результат больше истинного, то при следующих измерениях столь же вероятно может получиться результат меньше истинного. Очевидно, многократные повторения одного и того же измерения уменьшат влияние случайных ошибок, так как нет основания считать отклонение от истинного значения в одну сторону более вероятным, чем в другую, и среднее арифметическое из большого числа измерений будет ближе к истинному значению, чем отдельные измерения.

Математический аппарат вычисления случайных ошибок прямых измерений

1. При измерении какой-либо величины получают ряд значений:

$$(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (1)$$

2. Вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = x_{\text{cp}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (2)$$

3. Вычисляют отклонения отдельного измерения от среднего арифметического значения, т.е. абсолютную ошибку:

$$\Delta x_1 = |x_{\text{cp}} - x_1|; \Delta x_2 = |x_{\text{cp}} - x_2|; \Delta x_3 = |x_{\text{cp}} - x_3|; \dots; \Delta x_n = |x_{\text{cp}} - x_n|. \quad (3)$$

4. Вычисляют среднее арифметическое численных значений отдельных абсолютных ошибок, т.е. **среднюю абсолютную ошибку** всех измерений записывают как:

$$\langle \Delta x \rangle = \Delta x_{\text{cp}} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n}{n}. \quad (4)$$

5. Тогда результат измерения:

$$x = \langle x \rangle \pm \langle \Delta x \rangle. \quad (5)$$

7. Отношение средней абсолютной ошибки всех измерений $\langle \Delta x \rangle$ к среднему арифметическому значению $\langle x \rangle$ измеряемых величин называется **средней относительной ошибкой**:

$$\varepsilon = \delta = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle} 100\%. \quad (6)$$

Пример:

1. Пусть при $n=3$ измерений сопротивления проволоки с помощью прибора ЕС-11 получены следующие числовые значения $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$:

$$R_1 = 5,0 \text{ Ом}; \quad R_2 = 4,9 \text{ Ом}; \quad R_3 = 5,1 \text{ Ом}.$$

2. Найдем среднее арифметическое значение величины по формуле (2):

$$\langle R \rangle = \frac{5,0 + 4,9 + 5,1}{3} = 5,0 \text{ (Ом)}.$$

3. Вычислим абсолютные ошибки измерения по формуле (3):

$$\Delta R_1 = |5,0 - 5,0| = 0 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_2 = |5,0 - 4,9| = 0,1 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_3 = |5,0 - 5,1| = 0,1 \text{ (Ом)}$$

4. Вычислим среднюю абсолютную ошибку по формуле (4):

$$\langle \Delta R \rangle = \frac{0 + 0,1 + 0,1}{3} = 0,07 \text{ (Ом)}.$$

5. Запишем результат измерения по формуле (5):

$$R = (5,0 \pm 0,07) \text{ Ом}.$$

6. Определим относительную ошибку измерения по формуле (6):

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta R \rangle}{\langle R \rangle} \cdot 100\% = \frac{0,07}{5,0} \cdot 100\% = 1,4\%.$$

Раздел 1. Механика

Лабораторная работа №1

Определение линейных размеров и объемов тел правильной формы, оценка погрешностей измерений

Цель работы: Научиться определять линейные размеры и объемы тел правильной формы с помощью микрометра и штангенциркуля.

Приборы и принадлежности: микрометр, штангенциркуль, шар, цилиндр, параллелепипед.

Теория работы

Для измерения линейных размеров с точностью до долей миллиметра используются измерительные приборы: **штангенциркуль** (точность измерения 0,1 мм; 0,05 мм) и **микрометр** (точность измерения 0,01 мм), имеющие дополнительную шкалу – **нониус**.

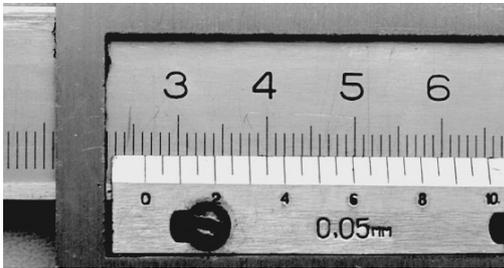


Рис.1.1. Шкалы штангенциркуля.

Число целых миллиметров отсчитывается по неподвижной линейке до пересечения с нулевым делением нониуса. Доли миллиметра содержащиеся в данном размере отсчитываются по нониусу – на шкале нониуса отыскивается деление, наиболее точно совпадающее с делениями основной шкалы (в идеальном случае риски, нанесенные на обе шкалы, сливаются в одну черту), тогда в записи размера тела после запятой записывается число соответствующее данной риске на шкале нониуса. Причем в итоговой записи линейного размера измеряемого тела после запятой необходимо указывать столько знаков, сколько указано на нониусе (эта величина называется точностью нониуса – на рис. 1.1 она равна 0,05 мм). Таким образом, на рисунке 1.1 измеренный размер – 26,30 мм.

Штангенциркуль состоит из неподвижной стальной линейки с миллиметровыми делениями и подвижной части с дополнительной шкалой (Рис. 1.1). Для измерения линейного размера тела необходимо зажать его между ножками штангенциркуля и закрепить винтом, чтобы подвижная часть прибора не сместилась в ходе снятия числовых данных. Число целых миллиметров

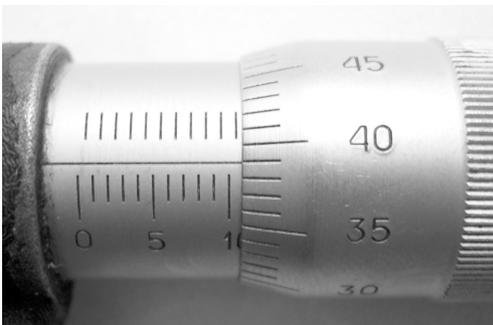


Рис.1.2. Шкалы микрометра.

Для измерения линейного размера тела необходимо зажать его между упором и микрометрическим винтом, который вращают за головку до появления треска трещотки (этим обеспечивается равенство усилий сжатия предметов). Далее производят отсчет измеренной величины: сначала снимают показания неподвижной части прибора до вращающегося барабана, а затем к этому числу при-

Микрометр (Рис. 1.2) состоит из неподвижной цилиндрической части со шкалой, имеющей цену деления 0,50 мм (на нижней шкале обозначены миллиметры, а на верхней – их половины) и подвижной части, представляющей собой микрометрический винт с закрепленным на нем полым цилиндром, на котором по окружности нанесены деления дополнительной шкалы (цена деления 0,01 мм). Для измерения линейного размера

бавляют сотые доли измеряемой величины, соответствующие делению вращающегося барабана совпадающего с осевой линией неподвижной части. Причем в итоговой записи линейного размера измеряемого тела после запятой необходимо указывать два знака. На рис. 1.2 измеренный размер – 10,89 (10,50 + 0,39) мм.

Для измерения объемов тел правильной геометрической формы измеряют их линейные размеры и по определенной формуле вычисляют объем.

Порядок выполнения работы

Задание №1. Вычисление объема шара

1. С помощью микрометра измерить 3 раза диаметр шара d (в различных направлениях).
2. По формуле $V_{ш} = \pi d^3/6$ вычислить объем шара.
3. Найти среднее значение объема, вычислить абсолютные и относительные погрешности.
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.
5. Результат измерений записать в виде $V_{ш} = \langle V_{ш} \rangle \pm \langle \Delta V_{ш} \rangle$.

№	d , м	$V_{ш}$, м ³	$\langle V_{ш} \rangle$, м ³	$\Delta V_{ш}$, м ³	$\langle \Delta V_{ш} \rangle$, м ³	ε_V , %
1						
2						
3						

Вычисления к заданию №1:

Задание №2. Вычисление объема цилиндра

1. С помощью штангенциркуля измерить диаметр цилиндра D и высоту H в 3-х различных местах.
2. По формуле $V_{ц} = \pi D^2 H/4$ вычислить объем цилиндра.
3. Найти среднее значение объема, вычислить абсолютные и относительные погрешности.
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.
5. Результат измерений записать в виде $V_{ц} = \langle V_{ц} \rangle \pm \langle \Delta V_{ц} \rangle$.

№	H , м	D , м	$V_{ц}$, м ³	$\langle V_{ц} \rangle$, м ³	$\Delta V_{ц}$, м ³	$\langle \Delta V_{ц} \rangle$, м ³	ε_V , %
1							
2							
3							

Вычисления к заданию №2:

Задание №3. Вычисление объема параллелепипеда

1. С помощью штангенциркуля измерить размеры параллелепипеда a , b , h в 3-х различных местах.
2. По формуле $V_n = abh$ вычислить объем параллелепипеда.
3. Найти среднее значение объема, вычислить абсолютные и относительные погрешности.
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.
5. Результат измерений записать в виде $V_n = \langle V_n \rangle \pm \langle \Delta V_n \rangle$.

№	a , м	b , м	h , м	V_n м ³	$\langle V_n \rangle$, м ³	ΔV_n , м ³	$\langle \Delta V_n \rangle$, м ³	ϵ_V , %
1								
2								
3								

Вычисления к заданию №3:

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Опишите устройство измерительных приборов: штангенциркуля и микрометра.
2. Объясните методику измерений с помощью штангенциркуля и микрометра.
3. Как вычисляются абсолютная и относительная погрешности?
4. Сделайте вывод о том, какой из измерительных приборов позволяет производить измерения линейных размеров тел с наименьшей относительной погрешностью.

Лабораторная работа №2

Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда

Цель работы: изучить основные характеристики кинематики равномерного и равноускоренного прямолинейного движения, научиться их определять. Изучить законы динамики поступательного движения, научиться находить ускорение тела как результат действия на него многих сил. Убедиться в справедливости второго закона Ньютона.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, перегрузы, секундомер.

Теория работы

Кинематика – это раздел физики, который изучает законы движения тел без учета причин, вызывающих это движение.

Для простоты изучения движения вводят понятие материальной точки.

Материальная точка – это тело, формами и размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

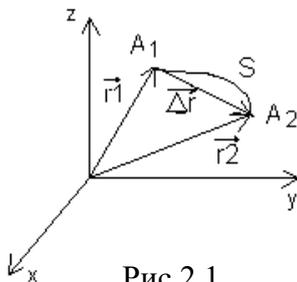


Рис.2.1

Система координат, связанная с ней материальная точка и часы вместе образуют систему отсчёта.

Траектория – это линия, которую описывает тело в процессе своего движения (Рис.2.1).

Путь (S) – это длина линии, вдоль которой движется тело, т.е. длина траектории.

Положение точки в системе отсчета задается **радиус-вектором** \vec{r} – это вектор, соединяющий начало координат с материальной точкой.

Пусть тело движется по криволинейной траектории (Рис.2.1) из положения A_1 в положение A_2 . Тогда радиус-вектор изменится от \vec{r}_1 до \vec{r}_2 .

Перемещение $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ – это вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела.

Для характеристики движения вводят два вида скорости:

Средняя скорость – это скалярная физическая величина, численно равная отношению пути ко времени, за который этот путь пройден:

$$v_{cp} = \frac{S}{t} \quad (2.1)$$

Мгновенная скорость – это изменение радиус – вектора за единицу времени или его производная по времени:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (2.2)$$

Размерность скорости: $[v] = \frac{м}{с}$.

Так как в процессе движения скорость может изменяться, то для характеристики быстроты изменения скорости используется мгновенное ускорение.

Ускорение – это физическая величина, численно равная изменению скорости за единицу времени. **Мгновенное ускорение** – это ускорение тела в заданный момент времени.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = (\vec{v})'_t \quad (2.3)$$

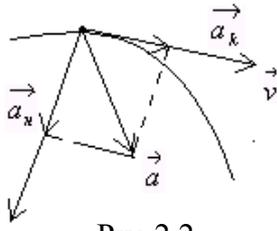


Рис.2.2

Если материальная точка обладает ускорением \vec{a} (Рис.2.2), то его можно разложить на две составляющие: касательное ускорение \vec{a}_k , направленное по касательной к траектории, и нормальное или центростремительное ускорение \vec{a}_n , направленное перпендикулярно к скорости. Тогда вектор полного ускорения определяется по правилу сложения векторов – по правилу параллело-

грамма:

$$\vec{a} = \vec{a}_k + \vec{a}_n.$$

А его величина определяется по теореме Пифагора:

$$|a| = \sqrt{|\vec{a}_k|^2 + |\vec{a}_n|^2}. \quad (2.4)$$

Так как касательное ускорение \vec{a}_k совпадает по направлению с направлением скорости \vec{v} , то оно характеризует изменение скорости по величине. Так как нормальное ускорение \vec{a}_n перпендикулярно вектору скорости \vec{v} , то оно характеризует изменение скорости по направлению. Но касательное ускорение $a_k = \frac{dv}{dt}$, а

нормальное ускорение $a_n = \frac{v^2}{R}$ где R - радиус кривизны траектории. Тогда величина полного ускорения:

$$|a| = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2}. \quad (2.5)$$

В зависимости от наличия касательного \vec{a}_k и нормального ускорений \vec{a}_n различают четыре вида движения:

1-й вид движения: Когда и касательное и нормальное ускорения отсутствуют, т.е. равны нулю: $\vec{a}_n = 0$ и $\vec{a}_k = 0$, тогда скорость остается постоянной: $\vec{v} = \text{const}$. Такой вид движения, при котором вектор скорости остается постоянным (т.е. не меняется ни по величине, ни по направлению), называется **равномерным и прямолинейным**.

Необходимо обратить Ваше внимание на то, что в определении равномерного и прямолинейного движения – движение Мы назвали с помощью двух слов «Равномерное» и «Прямолинейное». Часто на этот принципиальный момент не обращают должного внимания. Итак! Слово «Равномерное» означает то, что вектор скорости не изменяется по величине (т.к. отсутствует касательное ускорение). Слово «Прямолинейное» означает то, что вектор скорости не изменяется по направлению (т.к. отсутствует нормальное ускорение).

Примером такого вида движения может быть случай, когда Вы едете на машине, нажимая на акселератор (педаль «Газ») с одинаковым усилием (т.е. не разгоняя и не тормозя машину), и держите все время «Руль» прямо. Т.е., нажимая на педали «Газ» и «Тормоз», мы управляем касательным ускорением, изменяющим величину вектора скорости, а, поворачивая «Руль» и управляя колесами машины, управляем нормальным ускорением, изменяющим направление вектора скорости.

Скорость при равномерном и прямолинейном движении определяется наиболее просто, как путь, пройденный за единицу времени:

$$v = \frac{S}{t}. \quad (2.6)$$

2-й вид движения: Когда на тело действует касательное ускорение не равное нулю ($\vec{a}_k \neq 0$), но нормального ускорения нет ($\vec{a}_n = 0$). Тогда полное ускорение равно касательному, т.е. $\vec{a} = \vec{a}_k$ и вектор скорости изменяется по величине $|v| \neq \text{const}$ (причем за равные промежутки времени модуль скорости изменяется на одинаковую величину - поэтому такое движение **равнопеременное**: равноускоренное или равнозамедленное). Т.к. нормальное ускорение равно нулю, то, как и в 1-м виде движения, вектор скорости не изменяется по направлению, т.е. движение происходит по прямой линии - **прямолинейное движение**. Таким образом, собирая эти две характеристики, назовем: *такой вид движения, при котором на тело действует только касательное ускорение называется равнопеременным и прямолинейным*. Например, Вы едете на машине, равномерно увеличивая модуль скорости (увеличивая давление на педали «Газ» или «Тормоз»), и удерживая «Руль» в одном и том же положении.

Скорость и путь при равнопеременном прямолинейном движении:

$$v = v_0 + at, \quad (2.7)$$

$$S = S_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}, \quad (2.8)$$

где «+» - равноускоренное, «-» - равнозамедленное движение;

3-й вид движения: Когда на тело действует отличное от нуля нормальное ускорение $\vec{a}_n \neq 0$, но касательного ускорения нет $\vec{a}_k = 0$ (т.е. модуль скорости остается постоянным $|v| = \text{const}$). Тогда полное ускорение $\vec{a} = \vec{a}_n$ и вектор скорости одинаково изменяется по направлению за равные промежутки времени ($\vec{v} \neq \text{const}$). *Такое движение, при котором на тело действует только нормальное ускорение, называется равномерным движением по окружности*. Например, Вы едете на машине нажимая на «Газ» с одинаковым усилием (т.е. не разгоняя и не тормозя машину), но «Руль» держите постоянно повернутым на одинаковый угол.

4-й вид движения: Когда на тело действует отличное от нуля и касательное $\vec{a}_k \neq 0$ и нормальное $\vec{a}_n \neq 0$ ускорения. Этот случай является наиболее общим случаем движения, обобщающим 2-й и 3-й случаи. Тогда полное ускорение и его абсолютная величина находятся по формулам (2.4), (2.5), а величина скорости и путь по формулам (2.7), (2.8). *Такой вид движения, при котором на тело действует и касательное и нормальное ускорение называется равнопеременным криволинейным движением*.

Динамика изучает движение тел и причины, вызывающие это движение. Изучение причин возникновения движения тел сводится к трём законам Ньютона.

Для того, чтобы тело пришло в движение необходимо действие на него какого-то другого тела.

Мерой воздействия одного тела на другое является сила \vec{F} .

Если одинаковая сила действует на разные тела, то они по-разному будут реагировать на это воздействие. Такая способность тел по-разному реагировать на одинаковое воздействие называется **инертностью тела**.

Инерция – это способность тела находиться в состоянии покоя или в состоянии равномерного и прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или действие всех тел взаимно скомпенсировано.

Мерой инертности тела является масса m .

Первый закон Ньютона: существуют такие системы отсчёта (инерциальные), относительно которых тела находятся в состоянии покоя или движутся

ся равномерно и прямолинейно, если на них не действуют никакие силы или действие всех сил взаимно скомпенсировано. Математически это можно записать:

$$\vec{v} = 0 \quad \text{или} \quad \vec{v} = \text{const} \quad , \quad \text{если} \quad \vec{F} = 0 \quad \text{или} \quad \sum \vec{F} = 0 \quad . \quad (2.9)$$

Второй закон Ньютона: ускорение, которое приобретает тело под действием силы или суммы сил, действующих на него, прямо пропорционально сумме сил, направлено в сторону равнодействующей этих сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \quad . \quad (2.10)$$

И как следствие
$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad . \quad (2.11)$$

Третий закон Ньютона: два тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по величине и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1} \quad \text{и} \quad |\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}| \quad . \quad (2.12)$$

В данной лабораторной работе предлагается исследовать:

I. Законы кинематики поступательного движения.

1. прямолинейное равномерное движение, при котором необходимо определить скорость равномерного движения с использованием формулы (2.6);
2. прямолинейное равноускоренное движение, при котором необходимо определить ускорение тела двумя способами:
 - а) по формуле (2.7) для скорости равноускоренного движения;
 - б) по формуле (2.8) для пути при равноускоренном движении.

II. Законы динамики поступательного движения.

Второй закон Ньютона (2.10), с помощью которого определить ускорение как результат действующих на тело сил.

III. Соответствие между двумя способами описания движения на основании кинематики и динамики поступательного движения.

На основании сравнения ускорений, найденных различными методами кинематики и динамики необходимо сделать вывод о применимости данных формул.

Теория лабораторной работы

Основные законы кинематики и динамики могут быть проверены опытным путем на машине Атвуда (Рис.2.3). Машина Атвуда состоит из вертикальной штанги 6 со шкалой, сверху которой установлен легкий блок 1, способный вращаться с незначительным трением. Через блок перекинута тонкая нить с прикрепленными грузами 2 одинаковой массы m . Грузы могут быть установлены на передвигающейся по вертикальной штанге подставке 5, которая может быть снабжена электромагнитом для удержания грузов. На штанге крепится кольцо 4, предназначенное для снятия перегрузка массой m_1 , под действием которого грузы приходят в движение.

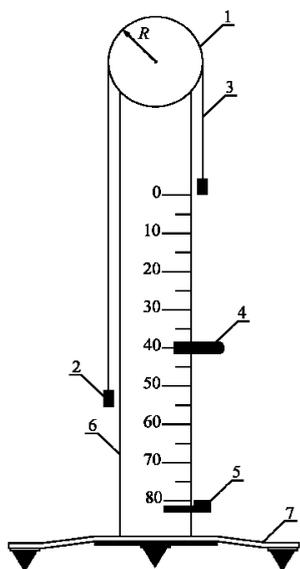


Рис.2.3

Рассмотрим движение системы, состоящей из двух грузов массой m и $m+m_1$ и блока радиусом r с моментом инерции J .

Если грузы одинаковы, то потенциальная энергия системы не зависит от их высоты, т.к. убыль энергии одного груза приводит к эквивалентному возрастанию потенциальной энергии другого. Когда грузы различны, из-

менение потенциальной энергии системы определяется положением перегрузка массой m_1 .

Согласно закона сохранения энергии (работой сил трения пренебрегаем) изменение потенциальной энергии системы $\Delta E = m_1gh$ переходит в кинетическую энергию поступательного и вращательного движения, т.е.:

$$m_1gh = \frac{mv^2}{2} + \frac{(m + m_1)v^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} . \quad (2.13)$$

где $h = \frac{at^2}{2}$ - высота опускания груза с перегрузом, $\omega = \frac{v}{r}$ - угловая скорость вращения, $v = at$ - линейная скорость. Подставляя значения h , ω , v в (2.13), получим:

$$a = \frac{m_1g}{2m + m_1 + \frac{J}{r^2}} . \quad (2.14)$$

Если пренебречь моментом инерции блока, формула (2.14) примет вид:

$$a = \frac{m_1g}{2m + m_1} . \quad (2.15)$$

Порядок выполнения работы

Задание №1

Исследование кинематики прямолинейного равномерного движения

При выполнении данного задания необходимо определить скорость равномерного прямолинейного движения груза с перегрузком на участке пути $S' = 0,3$ м, для чего:

1. Установить верхнюю платформу на отметке 30 см, а нижнюю платформу на отметке 60 см. (Расстояние между ними $S' = 0,3$ м).
2. Удерживая правый груз в верхнем положении, положить на него перегрузок.
3. Поднять правый груз с перегрузком до отметки 0 (отсчет уровня производить по нижнему краю груза. При этом начальное расстояние, на котором происходит ускоренное движение $S = 0,3$ м – это путь разгона. Начальная скорость при движении системы из состояния покоя $v_0 = 0$).
4. Отпустить груз. При этом груз с перегрузком начнет двигаться равноускоренно за счет силы тяжести, действующей на перегрузки. Скорость системы будет увеличиваться до того момента, когда перегрузок окажется снят платформой 4. С этого момента груз будет двигаться равномерно.
5. В момент, когда перегрузок окажется, снят платформой 4, включить секундомер и выключить его в момент, когда груз коснется нижней платформы 5. При этом вы измерить время равномерного движения t' .
6. Опыт повторите 3 раза при одном и том же начальном пути разгона S .
7. Повторить серию опытов при начальном пути разгона $S = 0,25$ м. Для этого движение груза с перегрузком должно начинаться не от 0, а от отметки 5 см.
8. Используя формулу (2.6), вычислить скорости равномерного движения, учитывая, что путь равномерного движения в данном задании $S = S' = 0,3$ м.
9. Вычислить среднее значение скорости равномерного движения при двух значениях начального пути разгона.
10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

Равномерное движение при $S'=0,3$ м				
Путь разгона	№ опыта	t' , с	v , м/с	v_{cp} , м/с
$S=0,3$ м	1			
	2			
	3			
$S=0,25$ м	4			
	5			
	6			

Задание №2

Исследование кинематики прямолинейного равноускоренного движения

При выполнении данного задания необходимо определить ускорение при движении груза с перегрузком на участках пути разгона $S=0,3$ м и $S=0,25$ м, для чего:

1. Повторить те же действия, что и в пунктах 1,2,3 задания №1.
2. Отпустить груз и одновременно включите секундомер. Выключить секундомер в момент снятия перегрузка верхней платформой 4. При этом вы измерить время равноускоренного движения t .
3. Опыт повторить 3 раза при одном и том же пути разгона S .
4. Повторить серию опытов при начальном пути разгона $S=0,25$ м.
5. Найти среднее значение времени равноускоренного движения для каждого пути разгона.
6. Используя формулу (2.7), вычислить ускорение a_1 равноускоренного движения при учете, что движение начиналось из состояния покоя, т.е. с начальной скоростью $v_0=0$, а конечная скорость в момент снятия перегрузка – это скорость равномерного движения, измеренная в задании №1. Тогда:

$$a_1 = \frac{v_{cp}}{t_{cp}} .$$

7. С другой стороны, величину ускорения a_2 можно вычислить по формуле (2.8) для пути при равноускоренном движении, при учете, что начальное расстояние $S_0=0$. Тогда:

$$a_2 = \frac{2S}{t^2} .$$

8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2.

Путь разгона	№ опыта	t , с	t_{cp} , с	v_{cp} , м/с	a_1 , м/с ²	a_2 , м/с ²
$S=0,3$ м	1					
	2					
	3					
$S=0,25$ м	4					
	5					
	6					

Вычисления к заданию №2:

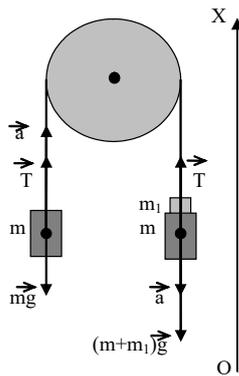


Рис.2.3

Задание №3

Исследование динамики поступательного движения

Для каждого тела применяем второй закон Ньютона:

$$\begin{cases} \vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}; \\ \vec{T} + (m + m_1)\vec{g} = (m + m_1)\vec{a}. \end{cases}$$

Проектируем все вектора на ось Ox :

$$\begin{cases} T - mg = ma; \\ T - (m + m_1)g = -(m + m_1)a. \end{cases}$$

Решаем систему уравнений и получаем выражение для теоретического ускорения:

$$a_{\text{теор.}} = \frac{m_1 g}{2m + m_1}. \quad (2.16)$$

1. Подставляя в формулу (2.16) массы: m – груза и m_1 – масса перегрузка, вычислить теоретическое ускорение. Записать его в таблицу 3.
2. Записать из таблиц 1 и 2 значения экспериментально найденных ускорений a_1 и a_2 и сравнить их с теоретическим значением для двух случаев начального пути разгона.
3. Сделать вывод о применимости второго закона Ньютона.

Таблица 3.

$m =$			
$m_1 =$			
Путь разгона	$a_1, \text{ м/с}^2$	$a_2, \text{ м/с}^2$	$a_{теор}, \text{ м/с}^2$
$S=0,3 \text{ м}$			
$S=0,25 \text{ м}$			

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Что изучает кинематика, динамика?
2. Дайте определения: материальной точки, траектории, перемещения, пути.
3. Запишите и сформулируйте определения средней и мгновенной скорости, ускорения.
4. Нарисуйте и объясните разложение вектора ускорения на составляющие. Как называются два вида ускорения, на какие характеристики вектора скорости они влияют? Запишите формулу полного ускорения.
5. Какие существуют виды поступательного движения? Объясните их с точки зрения наличия касательного и нормального ускорения.
6. Что такое инертность тела, масса, сила?
7. Запишите и дайте определения первого, второго и третьего законов Ньютона.
8. Объясните методику изучения кинематики прямолинейного равномерного и равноускоренного движения. Запишите и объясните расчетные формулы для определения скорости и ускорения.
9. Нарисуйте и объясните силы, действующие на механическую систему. Сделайте вывод формулы теоретического ускорения на основании второго закона Ньютона.
10. Сделайте вывод о корректности применения второго закона Ньютона.

Лабораторная работа №3

Проверка закона сохранения механической энергии

Цель работы: изучить закон сохранения энергии. Научиться: рассчитывать потенциальную и кинетическую энергию тела; давать трактовку различию получаемых экспериментальных результатов; оценивать критерий достоверности полученных экспериментальных результатов. Убедиться в справедливости закона сохранения механической энергии.

Приборы и принадлежности: установка для проверки закона сохранения механической энергии, шарик, линейка, листы белой и копировальной бумаги.

Теория работы

Если под действием силы F тело перемещается на некоторое расстояние dr (Рис.3.1), то говорят, что эта сила совершает **работу**. Работа A зависит от силы

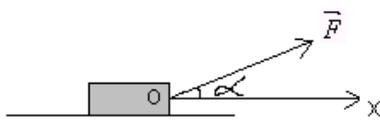


Рис.3.1

и расстояния, поэтому бесконечно малая работа на участке dr :

$$dA = F \cdot dr \cdot \cos \alpha, \quad (3.1)$$

где α – угол между направлением векторов силы \vec{F} и перемещения $d\vec{r}$. Полная работа равна сумме всех бесконечно малых работ (3.1) на каждом бесконечно малом участке: $A = \sum dA$. Но в математи-

ке, сумма бесконечно малых величин находится с помощью действия – интегрирования, тогда:

$$A = \int_0^S F dr, \quad (3.2)$$

где вектор перемещения изменяется от начального значения – 0, до конечного – S . Если сила постоянна ($\vec{F} = \text{const}$), то ее можно вынести за знак интеграла, а интеграл от перемещения dr даст нам величину пути:

$$A = F \cos \alpha \cdot \int_0^S dr = FS \cos \alpha. \quad (3.3)$$

Размерность работы: $[A] = \text{НЧм} = \text{Дж}$ (Джоуль).

Работа может совершаться быстрее или медленнее. Для такой способности силы используется понятие **мощность** – это работа, совершаемая за единицу времени:

$$N = \frac{A}{t} \quad (3.4)$$

Размерность работы: $[N] = \text{Дж/с} = \text{Вт}$ (Ватт).

Так как работу совершает какая-либо сила, а сила – это мера воздействия одного тела на другое, то работа силы – это работа одного тела над другим телом.

Способность тела совершать работу при переходе из одного состояния в другое называется энергией.

Работа может совершаться двумя способами:

1) Путём непосредственного воздействия (удар, давление). При этом тело, совершающее работу до момента воздействия должно двигаться ко второму телу. Тогда говорят, что такое тело обладает **кинетической энергией** (кинетика – движение):

$$W_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.5)$$

Кинетическая энергия – это энергия движения.

2) Путём воздействия на расстоянии (притяжение гравитационным полем, притяжение или отталкивание электрическим полем). При этом тело, над которым совершает работу некоторое поле, получает от этого поля энергию, называемую **потенциальной**. Примеры:

а) Тело, находящееся над поверхностью Земли на некоторой высоте h обладает, за счёт гравитационного поля Земли потенциальной энергией:

$$W_n = mgh \quad . \quad (3.6)$$

Такая потенциальная энергия называется - **потенциальная энергия в поле силы тяжести**.

б) При упругой деформации тела происходит взаимное смещение атомов в кристаллической решетке, и начинают действовать силы электрического поля – отталкивания или притяжения зарядов. В результате электрическое поле внутри тела совершает работу по восстановлению прежних размеров тела. Энергия, которую при этом расходует электрическое поле, называется **потенциальной энергией упругой деформации**:

$$W_n = \frac{k \cdot \Delta x^2}{2} \quad , \quad (3.7)$$

где k – коэффициент упругости (жёсткости); Δx - абсолютная деформация тела.

Потенциальная энергия – это энергия, которой обладает тело в поле!

Если тело движется в каком-либо поле, то оно обладает одновременно и кинетической и потенциальной энергией. Полной механической энергией тела называется сумма его кинетической и потенциальной энергий:

$$W = W_k + W_n \quad . \quad (3.8)$$

Если тело совершает работу, то $A = W - W_0$, т. е. работа, совершаемая телом, равна разности полной энергии в начальном и конечном состояниях.

Если добавить к полной механической внутренней энергии тела (энергию теплового хаотического движения атомов и молекул, из которых состоит само тело) и тепловую, которую теряет тело, например при ударе, то мы получим **полную энергию тела**:

$$W = W_k + W_n + W_{вн} + W_{тепл} \quad . \quad (3.9)$$

В замкнутой системе (система, в которой тела взаимодействуют только друг с другом и никакие внешние силы на систему не действуют) справедлив **закон сохранения полной энергии**: *полная энергия в замкнутой системе ниоткуда не возникает, никуда не исчезает, а только может превращаться из одних видов в другие или может быть израсходована на совершение работы*.

Если в механической системе действуют только консервативные силы (сила тяжести, сила упругости), то для нее выполняется закон сохранения механической энергии:

$$W = W_k + W_n = \text{const} \quad . \quad (3.10)$$

Т.е.: *полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют только консервативные силы, есть величина постоянная*.

В такой системе может происходить только превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно, но полный запас энергии при этом не изменяется.

Если же в системе, кроме консервативных сил, действуют еще и неконсервативные силы (силы трения), то полная механическая энергия не сохраняется. Работа неконсервативных сил $A_{н.к.} = W_2 - W_1$ (3.11) равна уменьшению энергии системы.

Для неконсервативных сил применяется также другое название – **диссипативные силы**. А сам процесс убыли энергии (например, под действием силы трения) называется **диссипацией энергии**. Говорят, что энергия **диссипирует** в

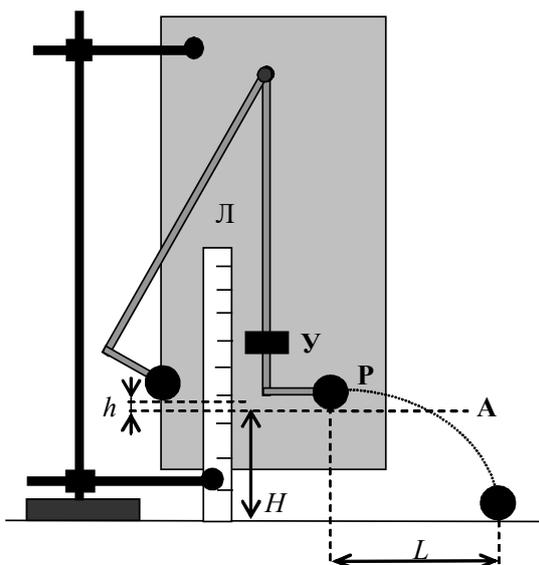


Рис.3.2

При ударе стержня об упор **У** шарик срывается со стержня и движется по параболе. Измеряя дальность полета L и высоту падения шарика H , можно найти его скорость в момент отрыва от стержня – в точке **Р**.

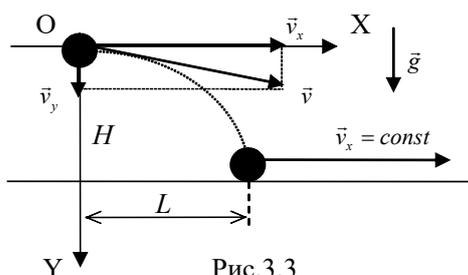


Рис.3.3

Спроектируем вектор скорости в момент отрыва шарика от стержня на оси OX и OY (Рис.3.3). Учтем, что на шарик действует только сила тяжести, направленное вертикально вниз (вдоль оси OY). Поэтому, будет увеличиваться только игрековая компонента скорости \vec{v}_y . При этом, движение вдоль оси OY будет равноускоренным. Вдоль оси OX ускорение равно нулю, поэтому, компонента скорости $\vec{v}_x = \text{const}$ будет оставаться постоянной и движение вдоль оси OX будет равномерным. Но скорость при равномерном движении вдоль оси OX можно найти по формуле (2.6):

$$v_x = \frac{L}{t} . \quad (3.14)$$

Нам остается найти время полета. Для этого учтем, что нам известно расстояние, пройденное шариком вдоль оси OY – это высота H , с которой падает шарик. А расстояние, пройденное телом при равноускоренном движении вдоль оси OY , можно найти по формуле (2.8):

$$H = v_{0y}t + \frac{gt^2}{2} .$$

Учитывая, что начальная скорость вдоль оси OY в момент отрыва $v_{0y} = 0$, то уравнение для высоты полета: $H = \frac{gt^2}{2}$, откуда найдем время полета:

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} . \quad (3.15)$$

Подставляя время полета (3.15) в выражение скорости (3.14), получим:

$$v = v_x = L\sqrt{\frac{g}{2H}} . \quad (3.16)$$

Подставляя скорость (3.16) в выражение кинетической энергии (3.13):

окружающую среду. А сами системы, в которых энергия не сохраняется, называются **диссипативными**.

Экспериментальная установка для проверки закона сохранения механической энергии показана на рис.3.2.

При отклонении шарика на высоту h относительно уровня **А** его полная энергия будет равна потенциальной:

$$W_n = mgh . \quad (3.12)$$

При движении стержня с шариком до положения равновесия **Р**, потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию поступательного движения тела:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} . \quad (3.13)$$

$$W_k = \frac{mgL^2}{4H} . \quad (3.17)$$

Сравнивая значения потенциальной (3.12) и кинетической (3.17) энергий, можно экспериментально проверить закон сохранения механической энергии.

Порядок выполнения работы

1. Найти массу шарика с помощью весов.
2. Закрепить шарик на стержне и измерить высоту H над уровнем стола.
3. Отклонить стержень с шариком на некоторый угол и измерить высоту подъема шарика h относительно положения равновесия (уровня А).
4. Отпустить шарик и измерить дальность полета L , используя для фиксации точек падения шарика листы белой и копировальной бумаги.
5. Для данного угла отклонения стержня, опыт повторить 5 раз.
6. Провести аналогичные измерения для другого угла отклонения стержня.
7. По формуле (3.12) рассчитать потенциальную энергию шарика в момент отклонения от положения равновесия.
8. По формуле (3.17) найти кинетическую энергию шарика в момент отрыва.
9. Для каждой серии опытов рассчитать среднее значение потенциальной и кинетической энергии.
10. Сравнить $\langle W_k \rangle$ в момент отрыва шарика с $\langle W_p \rangle$ при максимальном отклонении от положения равновесия. Сделать вывод о справедливости закона сохранения механической энергии.
11. Вычислить абсолютную погрешность ΔW_k определения кинетической энергии.
12. Вычислить абсолютную погрешность ΔW_p определения потенциальной энергии, учитывая приборную погрешность: $\Delta W_p = mg(1/3)\Delta l$, где $\Delta l = 1$ мм – цена деления измерительной линейки.
13. Вычислить критерий достоверности полученных результатов по выражению: $|\langle W_p \rangle - \langle W_k \rangle| < \sqrt{\langle \Delta W_p \rangle^2 + \langle \Delta W_k \rangle^2}$. Если данное неравенство выполняется, то опыт проведен достаточно точно и вывод о выполнении закона сохранения механической энергии правомерен.
14. Данные измерений и вычислений занести в таблицу.

Масса шарика $m =$								
Высота падения шарика $H =$								
Потенциальная энергия					Кинетическая энергия			
№	$h,$ м	$W_p,$ Дж	$\langle W_p \rangle,$ Дж	$\Delta W_p,$ Дж	$L,$ м	$W_k,$ Дж	$\langle W_k \rangle,$ Дж	$\Delta W_k,$ Дж
1								
2								
3								
4								
5								
1								
2								
3								
4								
5								

Вычисления:

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Сделайте вывод формул и дайте определения: работа, мощность, энергия.
2. Запишите и сформулируйте закон сохранения механической энергии. Всегда ли он справедлив?
3. Приведите примеры, иллюстрирующие выполнение (не выполнение) закона сохранения механической энергии, дайте пояснения.
4. Как называются механические силы и системы, в которых не выполняется закон сохранения энергии? Что происходит при этом с энергией?
5. Назовите причины не точного выполнения закона сохранения механической энергии в рамках данной лабораторной работы.

Лабораторная работа №4
Изучение температурной зависимости
коэффициента вязкости жидкости с помощью
капиллярного вискозиметра

Цель работы: научиться определять вязкость жидкости; изучить капиллярный метод определения вязкости жидкости; найти и проанализировать зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры.

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд, капиллярный вискозиметр, резиновая груша, секундомер, нагреватель, ЛАТР, термометр.

Теория работы

При движении с различными скоростями слоев жидкости или газа между ними возникает трение, названное внутренним трением или вязкостью. В дополнение к этому между слоями молекул, смещающихся друг относительно друга, существуют силы взаимодействия. Сила внутреннего трения определяется из **уравнения Ньютона**:

$$F_{mp} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (4.1)$$

где η (греч. «этта») - коэффициент внутреннего трения или вязкости; $\Delta v/\Delta x$ - градиент скорости; S - площадь соприкасающихся слоев.

Сила внутреннего трения прямо пропорциональна градиенту скорости и площади соприкасающихся слоев.

Если выразить из (4.1) коэффициент вязкости η , то получим:

$$\eta = \frac{F_{mp}}{\frac{\Delta v}{\Delta x} S}, \quad (4.2)$$

т.е. коэффициент вязкости численно равен силе трения между слоями жидкости при единице площади их соприкосновения, если градиент скорости равен единице.

В системе СИ единица измерения вязкости - Па·с (Па - паскаль):

$$[\eta] = \frac{[F]}{\left[\frac{\Delta v}{\Delta x}\right] \cdot [S]} = \frac{\text{НЧМ}}{\frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot \text{М}^2} = \frac{\text{НЧс}}{\text{М}^2} = \text{ПаЧс}.$$

При небольшой скорости течения жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят один относительно другого, не перемешиваясь. Такое слоистое течение называется **ламинарным**.

В данной работе изучается метод измерения коэффициента вязкости жидкости по времени вытекания ее определенного объема через трубку известной длины и диаметра (**капиллярный вискозиметр**).

Определение коэффициента динамической вязкости капиллярным методом

Капиллярный метод определения коэффициента вязкости основан на использовании формулы Пуазейля для объема протекающей жидкости V по трубе известного радиуса r :

$$V = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{\pi r^4}{8\eta} t, \quad (4.3)$$

где $\frac{\Delta p}{\Delta x}$ - градиент давления в жидкости, t - время протекания жидкости.

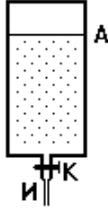


Рис. 4.1

В вертикально расположенный сосуд (Рис.4.1) наливают поочередно до одинакового уровня А жидкости с известным η_0 и неизвестным η_x коэффициентом вязкости. Открывая кран К, измеряют время вытекания жидкостей через капилляр - иглу И. Тогда выражение (4.3) для вытекающего объема V_0 известной жидкости:

$$V_0 = \frac{\Delta p_0 \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_0} \cdot t_0, \quad (4.4)$$

где t_0 - время вытекания жидкости с известным коэффициентом вязкости. Аналогично, для объема V_x вытекающей жидкости с неизвестным коэффициентом вязкости:

$$V_x = \frac{\Delta p_x \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_x} \cdot t_x, \quad (4.5)$$

где t_x - время вытекания жидкости с неизвестной вязкостью.

Для жидкости, налитой в вертикальный сосуд, изменение давления будет равно гидростатическому давлению столба жидкости $\Delta P = \rho gh$. Т.к. жидкости наливаются до одинакового уровня, то объемы их равны: $V_0 = V_x$ и соответственно равна высота столба жидкости $h_0 = h_x = h$. Тогда для известной жидкости $\Delta P_0 = \rho_0 gh$, для неизвестной жидкости $\Delta P_x = \rho_x gh$.

Приравнявая выражения (4.4) и (4.5) и, учитывая выражения для ΔP , получим:

$$\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h_0 \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_0} \cdot t_0 = \frac{\rho_x \cdot g \cdot h_x \cdot \pi \cdot r^4}{\Delta x \cdot 8 \cdot \eta_x} \cdot t_x.$$

Сокращая на одинаковые величины, получим:

$$\frac{\rho_0 \cdot t_0}{\eta_0} = \frac{\rho_x \cdot t_x}{\eta_x},$$

откуда выражаем коэффициент вязкости неизвестной жидкости:

$$\eta_x = \eta_0 \cdot \frac{\rho_x \cdot t_x}{\rho_0 \cdot t_0}. \quad (4.6)$$

Т.е., для нахождения коэффициента вязкости неизвестной жидкости необходимо знать коэффициент вязкости стандартной жидкости, ее плотность, время протекания стандартной жидкости, плотность неизвестной жидкости и ее время протекания.

Порядок выполнения работы

В работе используется промышленный капиллярный вискозиметр ВПЖ-1. Этот вискозиметр был градуирован в заводских условиях, т.е. уже определены: плотность, вязкость и время протекания стандартной жидкости. Тогда выражение (4.6) примет вид:

$$\eta_x = K \cdot \rho_x \cdot t_x, \quad (4.7)$$

где η_x - коэффициент вязкости жидкости; $K = \frac{\eta_0}{\rho_0 t_0} = \text{_____} \text{ м}^2/\text{с}^2$ - кон-

станта вискозиметра; t_x - время истечения жидкости в секундах; ρ_x - плотность исследуемой жидкости в $\text{кг}/\text{м}^3$;

Вискозиметр капиллярный (Рис.4.2) состоит из измерительного резервуара (3), ограниченного двумя кольцевыми отметками M_1 и M_2 , резервуар переходит в капилляр (2) и резервуар (1), который соединен с изогнутой трубкой (5) и трубкой (7). Последняя имеет резервуар (8) с двумя отметками M_3 и M_4 , указывающими пределы наполнения вискозиметра жидкостью. Жидкость из резервуара (3) по капилляру (2) стекает в резервуар (1) по стенкам последнего, образуя у нижнего конца капилляра «висячий уровень». Измерение вязкости при помощи капиллярного вискозиметра основано на определении времени истечения через капилляр

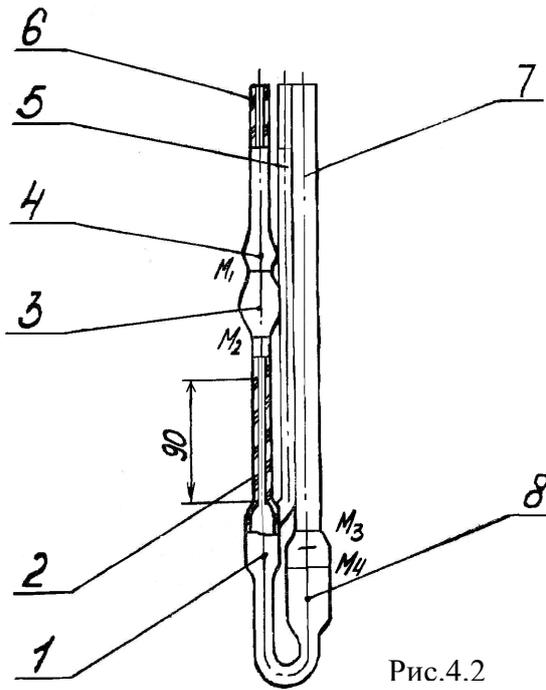


Рис.4.2

определенного объема жидкости из измерительного резервуара.

1. Испытуемую жидкость залить в чистый вискозиметр через трубку (7) так, чтобы ее уровень установился между отметками M_3 и M_4 .
2. На конец трубки (5) надеть резиновую трубку с краном и резиновой грушей.
3. На конец трубки (6) надеть резиновую трубку с краном.
4. Вискозиметр установить в жидкостный термостат.
5. При температуре измерения выдерживать прибор не менее 5 минут.
6. Закрыть кран, соединяющий трубки (5) и (6).
7. При открытых кранах на трубках (5) и (6) выдавить воздух из резиновой груши и, удерживая ее в сжатом состоянии, закрыть кран на трубке (6).
8. После этого, засосать грушей жидкость выше отметки M_1 примерно до половины резервуара (4).
9. Закрыть кран на трубке (5).
10. Открыв кран на тройнике, соединяющий трубки (5) и (6), включить секундомер и измерить время понижения уровня жидкости в трубке (5) от отметки M_1 до отметки M_2 .
11. Провести аналогичные измерения вязкости для жидкости ещё при двух значениях температуры с шагом $10\text{ }^\circ\text{C}$.
12. Определить по справочной таблице значение плотности жидкости при данной температуре. Записать ее в таблицу.
13. Вычислить вязкость жидкости по формуле (4.7).
14. Найти среднее значение вязкости и оценить погрешности.
15. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Справочная таблица зависимости плотности воды от температуры

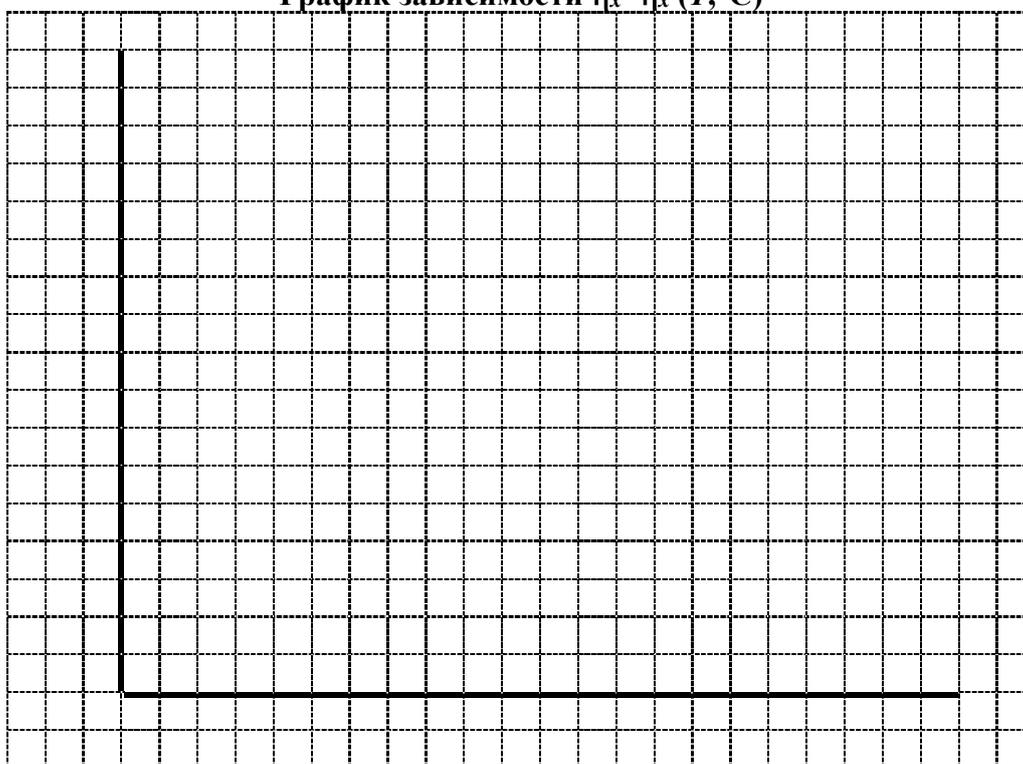
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\rho_x, \text{ кг/м}^3$	999,7	998,2	995,6	992,2	988,0	983,2	977,7	971,8	965,3

№	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_x, \text{ кг/м}^3$	$t_x, \text{ с}$	$\eta_x, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\langle \eta_x \rangle, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\Delta\eta_x, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\langle \Delta\eta_x \rangle, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\frac{\langle \Delta\eta_x \rangle}{\langle \eta_x \rangle} \cdot 100\%$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

16. Построить график зависимости коэффициента вязкости от температуры $\eta_x = \eta_x(T, ^\circ\text{C})$.
17. Сделать вывод о зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры.

Вычисления:

График зависимости $\eta_x = \eta_x(T, ^\circ\text{C})$



Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Запишите и дайте определение формулы Ньютона для силы трения между слоями жидкости или газа.
2. Запишите и дайте определение коэффициента вязкости.
3. Выведите формулу (4.6) для нахождения коэффициента вязкости капиллярным методом.
4. Объясните, как из формулы (4.6) получена практическая формула (4.7).

Лабораторная работа №5

Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы: изучить характеристики вязкой жидкости, научиться измерению вязкости жидкости методом Стокса.

Приборы и принадлежности: штатив, стеклянная трубка с машинным маслом, пипетка, стакан, секундомер, линейка, весы с разновесами.

Теория работы

При движении с различными скоростями слоев жидкости или газа между ними возникает трение, названное внутренним трением или вязкостью. В дополнение к этому между слоями молекул, смещающихся друг относительно друга, существуют силы взаимодействия. Сила внутреннего трения определяется из

уравнения Ньютона:

$$F_{тр} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S, \quad (5.1)$$

где η - коэффициент внутреннего трения или вязкости; $\Delta v / \Delta x$ - градиент скорости; S - площадь соприкасающихся слоев.

Сила внутреннего трения прямо пропорциональна градиенту скорости и площади соприкасающихся слоев.

Если выразить из (5.1) коэффициент вязкости η , то получим:
$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta x} S},$$

тогда **коэффициент вязкости численно равен силе трения между слоями жидкости при единице площади их соприкосновения, если градиент скорости равен единице.** В системе СИ единица измерения вязкости - Па·с (Па - паскаль):

$$[\eta] = \frac{[F]}{\left[\frac{\Delta v}{\Delta x}\right] \cdot [S]} = \frac{\text{НЧМ}}{\frac{\text{МЧМ}}{\text{с}} \cdot \text{М}^2} = \frac{\text{НЧс}}{\text{М}^2} = \text{ПаЧс}$$

При небольшой скорости течения жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят один относительно другого не перемешиваясь. Такое слоистое течение называется **ламинарным**. При движении тела в вязкой жидкости с небольшими скоростями обтекание тела жидкостью также будет ламинарным. В этом случае сила сопротивления движению тела со стороны жидкости определяется по закону Стокса. Для тела сферической формы:

$$F_c = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v,$$

где η - коэффициент вязкости, r - радиус тела, v - скорость движения тела в жидкости.

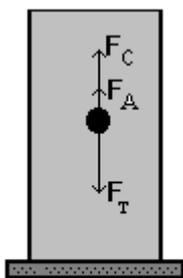


Рис.5.1

При установившемся движении шарика плотностью $\rho_{ш}$ в исследуемой жидкости плотностью $\rho_{ж}$ на шарик действуют силы тяжести F_T , сила сопротивления F_C и сила Архимеда F_A (Рис.5.1). По первому закону Ньютона при равномерном движении шарика в жидкости сумма всех действующих на него сил равна нулю:

$$F_T - F_A - F_C = 0, \quad (5.2)$$

тогда:

$$F_T = F_A + F_C$$

Учитывая, что масса шарика $m = \rho_{ш} V$, где V - объем шара, равный $V = 4/3 \pi r^3$, где r - радиус шарика, получаем, что масса $m = 4/3 \pi r^3 \rho_{ш}$.

Тогда сила тяжести: $F_T = mg = 4/3\pi r^3 \rho_{ш} g$.

Сила сопротивления: $F_C = 6\pi\eta r v$, где v - скорость движения тела.

Архимедова сила: $F_A = \rho_{ж} V g = 4/3\pi r^3 \rho_{ж} g$.

Тогда выражение (5.2) принимает вид:

$$4/3\pi r^3 \rho_{ш} g = 4/3\pi r^3 \rho_{ж} g + 6\pi\eta r v. \quad (5.3)$$

Из выражения (5.3) определяем коэффициент вязкости η :

$$\eta = \frac{\frac{4}{3}\pi g r^3 (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{6\pi r v} = \frac{2g r^2 (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{9v}. \quad (5.4)$$

Если учесть, что диаметр шара $d=2r$, а скорость при равномерном движении определяется как $v = \frac{L}{t}$, где L - расстояние, пройденное шариком за время t , то

выражение для определения коэффициента вязкости (5.4) примет вид:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 g t (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{L}. \quad (5.5)$$

Представим теперь, что роль шариков, равномерно двигающихся в жидкости, играют эритроциты, осаждающиеся в плазме крови. Если выразить из (5.4) скорость движения шарика, то мы получим скорость СОЭ – скорость оседания эритроцитов!

$$v = \frac{2}{9} \frac{g r^2 \cdot (\rho_{э} - \rho_{к})}{\eta_{к}} \quad (5.6)$$

Полученное выражение (5.6) поможет ответить на два очень важных в физиологии вопроса:

1) Почему в норме у здоровых организмов в зависимости от пола СОЭ отличается? Действительно, в норме у человека: у мужчин $v \approx 9 \div 10 \text{ мм/час}$, а у женщин $v \approx 14 \div 15 \text{ мм/час}$. **Почему у женщин СОЭ выше, чем у мужчин?**

Если посмотреть на выражение (5.6), то можно увидеть, что скорость прямо пропорциональна разности плотностей эритроцита и крови, и обратно пропорциональна вязкости крови. Действительно, у женщин плотность и вязкость крови меньше чем у мужчин за счет другого гормонального состава крови. Т.к. плотность крови у женщин меньше, это значит, что разность плотностей эритроцита и крови у женщин больше и соответственно больше СОЭ. Одновременно, т.к. вязкость крови меньше, то и она влияет на увеличение СОЭ по сравнению с СОЭ у мужчин.

2) Почему у одного и того же организма в разных физиологических состояниях СОЭ может отличаться?

Если опять обратиться к выражению (5.6), то следует отметить, что СОЭ прямо пропорциональна квадрату радиуса эритроцита. И хотя радиус самого эритроцита не меняется, но при наличии в организме воспалительного процесса эритроциты «склеиваются в эритроцитные бляшки». Т.е., в крови будут оседаться не сами эритроциты, а их скопления – конгломераты частиц, имеющие большой радиус и, соответственно, увеличивается СОЭ. Таким образом, определение СОЭ может служить индикатором наличия в организме воспалительного процесса.

Соотношение (5.5), строго говоря, справедливо лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси трубки радиусом R , в (5.5) необходимо ввести поправку, учитывающую наличие стенок трубки. У сте-

нок исследуемая жидкость покоится, а пограничный слой жидкости около шарика движется вместе с ним. Это приводит к увеличению градиента скорости, и, следовательно, скорость равномерного падения шарика в трубке будет меньше, чем в безграничной среде. Кроме того, формула (5.5) применима к недеформирующимся шарикам. Как показывает теория, для случая падения каплей жидкости учет этих обстоятельств приводит к следующему выражению:

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{gr^2(\rho - \rho_0) \cdot t}{(1 + 2,4r/R) \cdot l} \quad (5.7)$$

Порядок выполнения работы

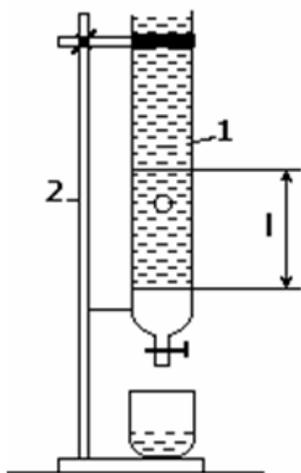


Рис.5.2

1. Измерительная установка представляет собой цилиндрический сосуд с налитым в него машинным маслом (Рис.5.2). Измерьте температуру масла (температуру воздуха в лаборатории). Плотность машинного масла при комнатной температуре – $\rho_0 = 910 \text{ кг/м}^3$.
2. Определите путем взвешивания массу пустого стакана (m_1).
3. Накапайте в него 50-100 капель воды из пипетки.
4. Определите массу стакана с водой (m_2) и найдите массу воды $m_0 = m_2 - m_1$.
5. Рассчитайте радиус капли: $r = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{m_0}{\pi \rho n}}$.
6. Измерьте внутренний радиус трубки R .
7. Измерьте расстояние l между метками на трубке.
8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.
9. Из пипетки капните одну каплю воды в трубку.
10. Определите время t прохождения капель этого расстояния l .
11. Опыт повторите пять раз.
12. По формуле (5.7) рассчитайте коэффициент вязкости масла. Сравните полученный результат с табличным ($\eta = 0,113 \text{ Па}\cdot\text{с}$).
13. Найдите среднее значение вязкости и оцените погрешности измерений.
14. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 1.

m_1 , кг	m_2 , кг	m_0 , кг	r , м	R , м	l , м

Таблица 2.

№	t , с	η , Па·с	$\langle \eta \rangle$, Па·с	$\Delta \eta$, Па·с	$\frac{\Delta \eta}{\langle \eta \rangle} \cdot 100\%$
1					
2					
3					
4					
5					

Вычисления:

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Запишите и дайте определение формулы Ньютона для силы трения между слоями жидкости или газа.
2. Запишите и дайте определение коэффициента вязкости. Укажите его единицы измерения.
3. Выведите расчетную формулу (5.5) для определения коэффициента вязкости по методу Стокса.
4. Выразите из формулы (5.5) выражение (5.6) для скорости оседания эритроцитов. Объясните: причины различия СОЭ в норме у мужчин и женщин; почему определение СОЭ является диагностическим методом определения воспалительных процессов в организме?

Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика

Лабораторная работа №6

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца

Цель работы: изучить молекулярные свойства жидкостей, научиться измерять коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца.

Приборы и принадлежности: сосуд, стакан, пружина, кольцо, штатив универсальный, весы с разновесами.

Теория работы

Жидкость - это вещество, находящееся в промежуточном состоянии между твердым и газообразным состоянием вещества. Т.е., молекулы жидкости не прикреплены так жестко, как атомы в узлах кристаллической решетки твердых тел, и одновременно, не так свободны, как молекулы в газах, которые находятся в состоянии теплового хаотического движения. Молекулы жидкости участвуют в колебательном и поступательном движениях.

Для жидкости характерны черты:

- расстояние между молекулами очень мало;
- в состоянии покоя каждая молекула находится в строго определенном месте и совершает только колебательное движение, но в определенные моменты времени молекулы жидкости могут меняться местами друг с другом и в этот момент они совершают поступательные движения (молекулы жидкости совершают так называемые «перескоки» из одного положения равновесия в другое);
- у жидкости отсутствует кристаллическая решетка, поэтому для неё характерно свойство - текучесть. Жидкость занимает предоставленный ей объем и принимает форму этого сосуда;
- для жидкости характерны все явления переноса.

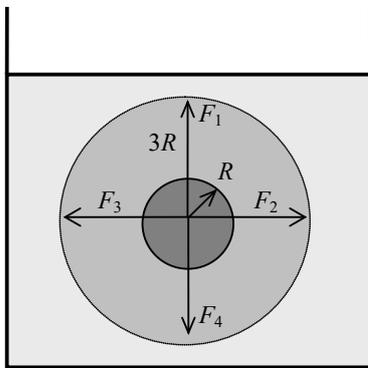


Рис.6.1

Рассмотрим молекулу радиуса R , находящуюся внутри жидкости (Рис.6.1). Со стороны соседних молекул, находящихся на расстоянии не ближе трех радиусов молекул, на нашу молекулу действуют силы притяжения и отталкивания. Сферическая поверхность (отмеченная пунктирной линией) радиуса $3R$ называется **сферой молекулярного взаимодействия** – это то наименьшее расстояние, на которое могут приблизиться молекулы в жидкости. Если молекулы начнут приближаться на расстояние меньше $3R$, то начнет происходить перекрывание электронных оболочек атомов и «включается» принцип запрета Паули, который разрешает находиться на одной орбитали только двум электронам с противоположным направлением спинов.

Т. к. соседние молекулы расположены симметрично, то сумма всех сил, действующих на молекулу равна нулю. Внутри жидкости молекулы находятся в состоянии равновесия.

Рассмотрим теперь молекулу, находящуюся в поверхностном слое жидкости (Рис.6.2). Спроектируем силы, действующие на нашу молекулу со стороны

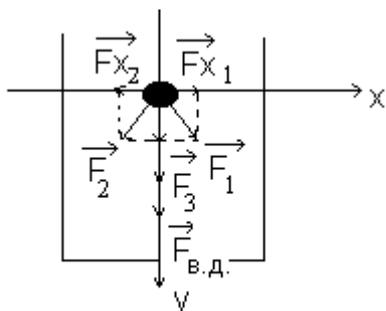


Рис.6.2

молекул, лежащих на границе сферы молекулярного взаимодействия, на оси OX и OY . Сумма всех проекций сил, действующих на молекулу, вдоль оси OX будет равна нулю - $\sum F_x = 0$ (потому что, как справа, так и слева от нашей молекулы находятся другие молекулы). Но сумма проекций сил на ось OY не равна нулю (потому что силы притяжения со стороны молекул жидкости не компенсируются силами притяжения со стороны молекул воздуха). В результате, молекулы, лежащие на поверхности жидкости, действуют на молекулы, лежащие в глубине жидкости с некоторой результирующей силой – силой внутреннего давления, т.е. $\sum F_y \equiv F_{в.д.}$ - сила внутреннего давления поверхностного слоя молекул. Если разделить силу внутреннего давления на площадь поверхности жидкости, то получим **внутреннее давление**:

$$\frac{F_{в.д.}}{S} = p .$$

Внутреннее давление – это давление, оказываемое молекулами поверхностного слоя на молекулы, лежащие в глубине жидкости.

Величина внутреннего давления в жидкости составляет огромные значения: от 10^4 до 10^5 атм., например, у ртути. Обратите внимание! Это давление не в Паскалях, а в атмосферах! На нас с вами действует давление всего в 1 атмосферу, а в жидкости оно достигает просто невероятных значений - 10 тысяч атмосфер. Молекулы в жидкости просто «спрессованы» под действием такого огромного давления и находятся на таких малых расстояниях – в пределах сферы молекулярного взаимодействия, что ближе приблизится они уже просто не в состоянии, потому что включается принцип запрета Паули. В таком случае возникает один из главных вопросов гидродинамики: **почему реальная жидкость является практически несжимаемой?** Как Вы думаете? Ответ можно сформулировать не совсем физически, но в принципе правильно:

жидкость является несжимаемой, потому что уже сжата под действием огромного внутреннего давления!

Если создать давление, превышающее внутреннее, то жидкость можно сжимать, но это очень сложная научная и техническая задача. Поэтому, при рассмотрении реальных жидкостей в наших «обычных» бытовых условиях, мы можем их считать несжимаемыми и пользоваться для описания движения уравнениями гидродинамики идеальной (т.е. несжимаемой) жидкости.

Для пытливого ума, естественно, возникает вопрос: а что будет, если удастся создать внешнее давление, превышающее внутреннее? Действительно, такой вопрос стоит перед наукой. Существует Теория металлического водорода! Действительно, если жидкий водород продолжать сжимать, то произойдет перекрытие электронных орбиталей, «лишние» электроны должны будут уйти из электронных облаков, т.е. станут коллективизированными. Между атомами водорода должна «включиться» ковалентная химическая связь (а это очень прочная связь – как, например, в металлах, в кристалле алмаза). Т.е. жидкий водород должен превратиться в металл! Как все красиво! Но почему же до сих пор наука не смогла его получить? А вот почему. Когда мы создаем внешнее давление, то давим каким-нибудь поршнем. Поршень сделан из металла, размеры атомов которого велики. Соответственно, велики и межатомные расстояния. А водород – это первый и самый маленький из атомов в таблице Менделеева. Он, просто «просачивается»

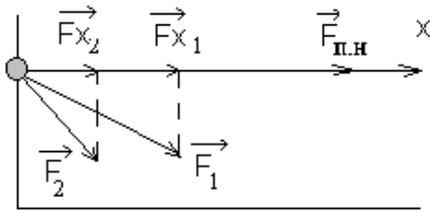


Рис.6.3

между атомами металла! Если удастся найти «чем давить», то, наверное, и удастся получить металлический водород.

Но мы с вами отвлеклись от дальнейшего изучения молекулярного строения жидкости.

Рассмотрим теперь молекулу, лежащую на краю поверхности жидкости (Рис.6.3) и спроектируем все силы на оси OX и OY . По-прежнему сумма проекций сил на ось OY даст нам силу внутреннего давления, и о ней мы больше говорить не будем. Но вот теперь, сумма проекций сил на ось OX тоже не равна нулю (потому что справа от нашей молекулы есть «соседи», притягивающие ее, а слева – нет). Такая результирующая сила $\sum F_x \equiv F_{п.н.}$ называется **силой поверхностного натяжения** – это сила, с которой молекулы, находящиеся на краю поверхности жидкости, действуют на молекулы, лежащие в глубине поверхности.

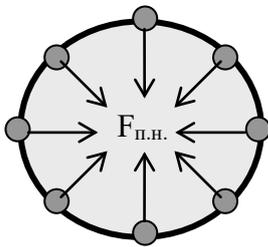


Рис. 6.4

Нальем, например, жидкость в сосуд цилиндрической формы и посмотрим на него сверху (Рис.6.4). Молекулы жидкости, лежащие на краю поверхности, будут создавать силу поверхностного натяжения, которая будет стремиться «сжать» поверхность. Таким образом, **сила поверхностного натяжения действует по касательной к поверхности жидкости перпендикулярно контуру, ограничивающему поверхность жидкости.**

При перемещении молекул из поверхностного слоя вглубь жидкости или, наоборот, из глубины жидкости на поверхность совершается работа. Эта работа тем больше, чем больше различие между силами взаимодействия молекул поверхностного слоя с молекулами жидкости и молекулами граничащей среды.

Рассмотрим жидкость, граничащую со своим паром. Концентрация молекул в воздухе и паре намного меньше, чем в жидкости. Поэтому на молекулы поверхностного слоя жидкости действует сила, направленная внутрь жидкости. Предположим теперь, что площадь поверхности жидкости при изотермическом обратимом процессе увеличилась на величину dS . Это значит, что некоторое количество молекул перешло из глубины жидкости в поверхностный слой. Следовательно, внешними силами совершена некоторая работа δA , которая прямо пропорциональна количеству молекул, перешедших в поверхностный слой, а значит, и увеличению площади поверхности жидкости на dS :

$$\delta A = \sigma dS, \quad (6.1)$$

где σ - (греч. «сигма») это коэффициент поверхностного натяжения.

Из (6.1) следует, что коэффициент поверхностного натяжения определяется работой, необходимой для изотермического обратимого увеличения площади поверхности на единицу.

Поскольку работа при изотермическом обратимом процессе равна изменению свободной энергии системы ($\delta A = dE$), то избыточная потенциальная энергия поверхности жидкости является ее свободной энергией dE . Тогда **коэффициент поверхностного натяжения можно определить как свободную энергию единицы площади поверхности жидкости:**

$$\sigma = \frac{dE}{dS} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{E}{S} . \quad (6.2)$$

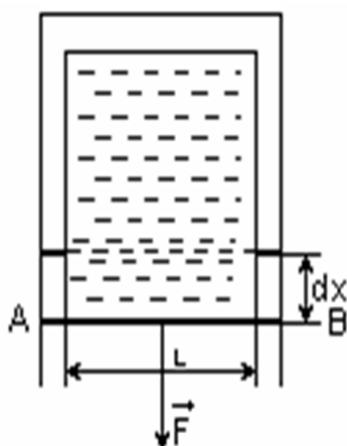


Рис 6 5

В состоянии устойчивого равновесия свободная энергия любой системы минимальна. Следовательно, в равновесии жидкость имеет минимальную площадь поверхности. Это значит, что должны существовать силы, стремящиеся сократить поверхность жидкости. Они направлены по касательной к поверхности жидкости.

Если проволочную рамку, одна из сторон AB которой подвижна (Рис. 6.5), поместить в мыльный раствор и затем вынуть из него, то вся рамка затянется пленкой жидкости. Силы поверхностного натяжения принуждают пленку сокращаться и перемещают перемычку AB . Чтобы ее удержать в равновесии, необходимо приложить внешнюю силу F . Так как пленка имеет две поверхности, вдоль каждой из которых дей-

ствует сила поверхностного натяжения $F_{н.н}$, то:
$$F=2F_{н.н} \quad (6.3)$$

Предположим, что при постоянной температуре бесконечно медленно перемычка AB перемещается на расстояние dx (Рис. 6.5). При этом внешняя сила совершает работу:

$$\delta A=2F_{н.н} dx. \quad (6.4)$$

Эта работа пойдет на увеличение свободной энергии поверхности пленки:

$$\delta A= dE= \sigma dS= \sigma 2Ldx, \quad (6.5)$$

где L – длина перемычки AB или длина контура, ограничивающего поверхностный слой. Тогда из (6.4) и (6.5) получим, что сила поверхностного натяжения:

$$F_{н.н} = \sigma \cdot L . \quad (6.6)$$

Сила поверхностного натяжения прямо пропорциональна длине контура, ограничивающего поверхность жидкости.

Из (6.6) выразим коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{F_{н.н.}}{L} . \quad (6.7)$$

В лабораторно-клинической практике по коэффициенту поверхностного натяжения определяют содержание желчных пигментов в моче. При их повышенном содержании коэффициент поверхностного натяжения σ резко уменьшается.

Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе поверхностного натяжения, с которой молекулы, лежащие на границе, действуют на единицу длины контура, ограничивающего поверхность жидкости.

Размерность коэффициента поверхностного натяжения: $[\sigma] = \frac{Н}{м}$.

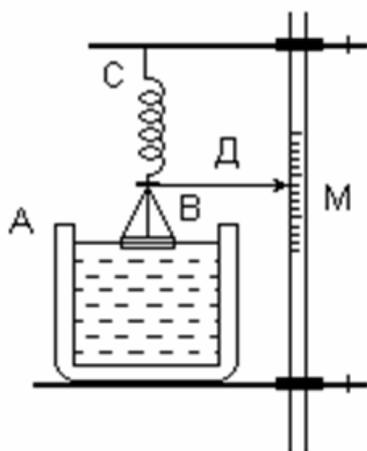


Рис.6.6

Порядок выполнения работы

В данной работе для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости используется метод отрыва кольца (Рис.6.6).

Исследуемая жидкость находится в сосуде A . Кольцо B , изготовленное из материала, хорошо смачиваемого этой жидкостью, подвешено на пружине C , к нижнему концу которой прикреплена стрелка D . Удлинение пружины и, следовательно, сила ее натяжения определяются по шкале M , которая нанесена на штативе.

При соприкосновении кольца с поверхностью исследуемой жидкости последняя, смачивая кольцо, поднимается по его стенкам и за счет силы поверхностного натяжения несколько втягивает кольцо внутрь жидкости.

По мере опускания поверхности воды пружина будет растягиваться, и в некоторый момент времени кольцо от поверхности оторвется. В этот момент сила поверхностного натяжения $F_{н.н.}$, действующая на всю длину линии разрыва поверхности, будет равна упругой силе $F_{упр}$, возникшей в растянутой пружине, которая определяется по **закону Гука**: *сила упругости прямо пропорциональна абсолютной деформации пружины*:

$$F_{упр} = k\Delta l, \quad (6.8)$$

где Δl – деформация (растяжение) пружины за счет силы поверхностного натяжения; k – коэффициент упругости (жесткости) пружины.

$$\text{В момент отрыва кольца} \quad F_{н.н.} = F_{упр}. \quad (6.9)$$

Подставляя в условие равновесия (6.9) в момент отрыва кольца силу поверхностного натяжения (6.6) и силу упругости (6.8), получим:

$$\sigma \cdot L = k\Delta l. \quad (6.10)$$

Поверхность жидкости разрывается по линиям двух окружностей (внешней и внутренней окружности кольца). Длина линии разрыва:

$$L = \pi(d_1 + d_2), \quad (6.11)$$

где d_1 и d_2 – внешний и внутренний диаметры кольца.

Подставляя (6.11) в (6.10), найдем: $\sigma \cdot \pi(d_1 + d_2) = k\Delta l$, откуда выразим коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{k\Delta l}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (6.12)$$

Задание №1. Определение коэффициента жесткости пружины

1. Определить массу кольца с помощью весов: $m = \underline{\hspace{2cm}}$ г.
2. Вычислить вес кольца $P = mg$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.
3. Заметить по шкале M на штативе начальное показание стрелки D .
4. Опустить столик с сосудом A в нижнее положение, чтобы при растяжении пружины кольцо не касалось поверхности воды.
5. Подвесить кольцо на пружину C .
6. Вычислить деформацию пружины Δl , как разность показаний стрелки D в конечном и начальном положении (по шкале M).
7. Вычислить коэффициент жесткости пружины из закона Гука по формуле:

$$k = \frac{P}{\Delta l}.$$

Вычисления к заданию №1:

Задание №2

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

1. Занесите в таблицу значение коэффициента жесткости пружины, вычисленное в задании №1.
2. Поднимите столик с сосудом A так, чтобы кольцо начало касаться поверхности жидкости. Заметьте начальное положение стрелки.
3. Медленно опускайте сосуд с жидкостью до момента отрыва кольца, глядя на положение стрелки D . (Особенно важно точно заметить, куда на шкале M показывает стрелка в момент отрыва кольца).
4. Вычислите дополнительное удлинение пружины Δl , обусловленное силой поверхностного натяжения.
5. Измерьте с помощью штангенциркуля внешний и внутренний диаметры кольца d_1 и d_2 во взаимно перпендикулярных направлениях и вычислите их среднее значение.
6. По формуле (6.12) вычислите коэффициент поверхностного натяжения жидкости.
7. Опыт повторите не менее 5 раз.
8. Рассчитайте погрешность измерений.
9. Сравните полученный результат с табличным : $\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 0,073 \text{ Н/м}$.
10. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

$k =$								
№	Δl , м	d_1 , м	d_2 , м	σ , Н/м	$\langle \sigma \rangle$, Н/м	$\Delta \sigma$, Н/м	$\langle \Delta \sigma \rangle$, Н/м	ε , %
1								
2								
3								
4								
5								
				$\sigma = \quad \pm$				

Вычисления к заданию №2:

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Что такое жидкость? На основании рис. 6.1 и 6.2 объясните причину возникновения внутреннего давления в жидкости. Что такое внутреннее давление? Почему жидкость является практически не сжимаемой?
2. На основании рис. 6.3 и 6.4 объясните причину возникновения поверхностного натяжения. Что такое сила и коэффициент поверхностного натяжения с точки зрения силы и свободной энергии? Сделайте вывод формулы (6.7).
3. На основании рис.6.6 объясните метод отрыва кольца, сделайте вывод расчетной формулы (6.12).

Лабораторная работа №7

Определение размеров молекул касторового масла

Цель работы: изучить явления смачивания и не смачивания, понять механизм возникновения газовой эмболии, определить диаметр и высоту молекулы касторового масла.

Приборы и принадлежности: ванночка, стеклянная палочка, пипетка, линейка, химический стаканчик, весы, разновесы, касторовое масло, марганцовка.

Теория работы

При взаимодействии жидкости с поверхностью твёрдого тела могут возникать два типа явлений.

Смачивание (Рис.7.1) – это явление, при котором сила взаимодействия между молекулами жидкости и молекулами твёрдого тела ($F_{ж-тв}$) больше, чем сила взаимодействия молекул жидкости между собой ($F_{ж-ж}$).

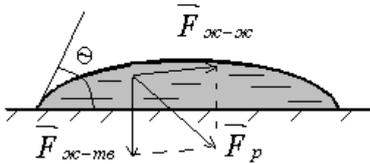


Рис.7.1

Тогда результирующая сила F_p направлена в сторону твердого тела и заставляет жидкость растекаться по поверхности твердого тела. Кривизна поверхности жидкости характеризуется **краевым углом θ** (греч. «тета») – это угол между твёрдым телом и касательной к поверхности жидкости и отсчитываемый внутри жидкости. При смачивании краевой угол острый, т.е. лежит в пределах $0 < \theta \leq 90^\circ$. Если $\theta = 0^\circ$, то такое явление называется **полным смачиванием** (это идеализированный предельный случай, при котором жидкость должна растечься в мономолекулярный слой).

Несмачивание (Рис.7.2) – это явление, при котором силы взаимодействия молекул жидкости и молекул твёрдого тела меньше чем, силы взаимодействия молекул жидкости между собой.

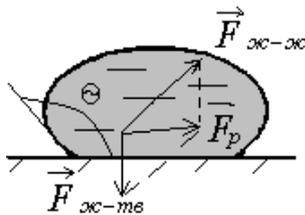


Рис.7.2

При несмачивании краевой угол тупой и лежит в интервале $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$. Если $\theta = 180^\circ$, то такое явление называется **полным несмачиванием**. В случае полного несмачивания жидкость практически должна соприкасаться с поверхностью твердого тела всего лишь одной молекулой, что в Земных условиях при действии силы тяжести невозможно.

Одна и та же жидкость может смачивать одну поверхность, а другую поверхность не смачивать. Например, вода смачивает стекло и не смачивает жиры; лист растения не смачивается водой, т. к. покрыт воскообразной смазкой.

За счёт смачивания и не смачивания жидкость, налитая в сосуд, будет иметь вид, представленный на рис.7.3.

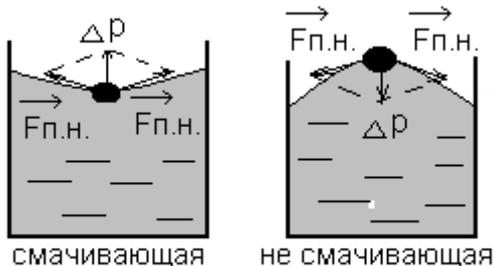


Рис.7.3

Рассмотрим молекулу, находящуюся на поверхности жидкости.

На молекулу в поверхностном слое действуют силы притяжения со стороны соседних молекул – силы поверхностного натяжения, но сумма всех сил, действующих на молекулу уже не равна нулю, как в случае ровной поверхности. Под действием некомпенсированных сил поверхност-

ного натяжения возникает результирующая сила, направленная при смачивании наружу, при не смачивании – внутрь жидкости.

Если найти отношение результирующей силы, действующей на молекулы, к площади поверхности жидкости, то получим Δp – **дополнительное давление**, возникающее в жидкости. Величину дополнительного давления можно опреде-

лить по **формуле Лапласа**:

$$\Delta p = \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (7.1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхности жидкости во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Если поверхность жидкости сферическая, то радиусы кривизны поверхности во взаимно перпендикулярных направлениях одинаковы $R_1 = R_2 = R$. Тогда

формула Лапласа примет более простой вид:

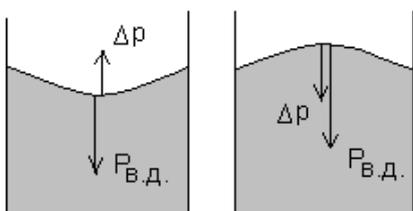
$$\Delta p = \pm \frac{2\sigma}{R}. \quad (7.2)$$


Рис.7.4

Возникает естественный вопрос: почему дополнительное давление называется **дополнительным давлением**? Оно имеет такое название, потому что дополняет внутренне давление, направленное всегда в глубь жидкости (Рис.7.4). Поэтому при смачивании дополнительное давление Δp направлено противоположно внутреннему давлению, чему в формуле Лапласа соответствует

знак «-». При не смачивании дополнительное давление Δp направлено в одну сторону с внутренним давлением, чему в формуле Лапласа соответствует знак «+».

Пусть в узкой трубке с жидкостью (капилляре) движется пузырёк воздуха (например, пузырек воздуха попал в кровеносную систему). И пусть, этот пузырек воздуха под действием течения крови, т.е. под действием давления крови $p_{кр}$ попал на разветвление более мелких кровеносных сосудов (Рис.7.5). Кровь смачивает стенки кровеносного сосуда, поэтому возникает вогнутая поверхность и, как следствие, дополнительное давление. Из формулы (7.2) видно, что, чем меньше радиус сосуда, тем больше дополнительное давление Δp в пузырьке воздуха. Поэтому, в капилляре большего радиуса возникает дополнительное давление Δp_1 меньшее, чем в более мелких капиллярах Δp_2 . В зависимости от радиусов более мелких капилляров может возникнуть ситуация, когда сумма давления крови и

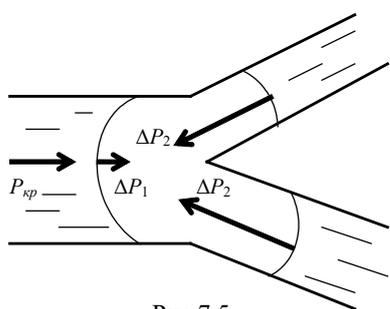


Рис.7.5

дополнительного давления Δp_1 станет меньше, чем суммарное дополнительное давление со стороны поверхностей в более мелких капиллярах, направленное противоположно течению крови. Давления крови окажется недостаточно, чтобы «протолкнуть» или «разорвать» этот пузырек воздуха. Произойдет закупорка – тромбирование кровеносного сосуда, называемая **газовая эмболия**, что может привести к летальному исходу для человека или животного. На основании рассмотренного явления – газовой эмболии становится понятно, почему очень важно выпускать все пузырьки воздуха при проведении внутримышечных и, особенно, внутривенных инъекций.

В отличие от газа или пара, которые всегда целиком заполняют предоставляемый им объем, жидкости образуют свободную поверхность, отделяющую данную жидкость от пограничной среды. В поверхностном слое действуют силы по-

верхностного натяжения.

Под действием сил поверхностного натяжения свободная поверхность жидкости стремится стать сферической. Обычно этому препятствует сила тяжести, под действием которой жидкость принимает форму того сосуда, в котором находится, а свободная поверхность делается горизонтальной.

Однако когда силы поверхностного натяжения значительно превосходят силу тяжести, свободная поверхность жидкости приближается к сферической.

Рассмотрим каплю некоторой жидкости 1, расположенную на поверхности другой, не смешивающейся с ней жидкости 2 (Рис.7.5).

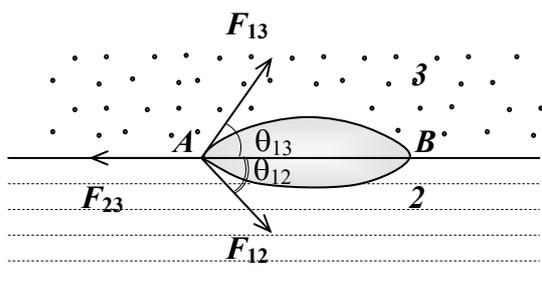


Рис.7.5

Форма капли устанавливается в данном случае под влиянием взаимодействия трех сред: жидкости 1, жидкости 2 и воздуха 3. Эти среды имеют общую границу - окружность, ограничивающую каплю и пересекающую плоскость чертежа в двух точках A и B. По этой окружности пересекаются между собой три поверхности:

- поверхность, ограничивающая жидкость 2 и воздух, вдоль которой действует сила поверхностного натяжения F_{23} с коэффициентом поверхностного натяжения σ_{23} ;
- поверхность, разграничивающая каплю жидкости 1 и воздух, вдоль которой действует сила поверхностного натяжения F_{13} с коэффициентом поверхностного натяжения σ_{13} ;
- поверхность, разграничивающая жидкости 1 и 2, вдоль которой действует сила поверхностного натяжения F_{12} с коэффициентом поверхностного натяжения σ_{12} .

На каждую единицу длины пограничной окружности будут действовать три силы поверхностного натяжения - F_{23} , F_{13} , F_{12} , прямо пропорциональные соответственно σ_{23} , σ_{13} , σ_{12} . Эти силы будут направлены по касательной к соответствующим поверхностям раздела. В результате поверхность капли образует с поверхностью второй жидкости краевые углы θ_1 и θ_2 .

В случае, когда силой тяжести по сравнению с силой поверхностного натяжения можно пренебречь, равновесной будет та форма капли, при которой векторная сумма всех сил поверхностного натяжения равна нулю:

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{23} + \vec{F}_{13} = 0.$$

Спроектируем силы поверхностного натяжения на горизонтальную поверхность второй жидкости и учтем, что силы F_{12} и F_{13} противоположны F_{23} , тогда:

$$F_{23} = F_{13} \cos\theta_{13} + F_{12} \cos\theta_{12}. \quad (7.3)$$

Отсюда следует, что для того, чтобы капля жидкости не растекалась, т.е. находилась в состоянии равновесия, необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$F_{23} \leq F_{13} \cos\theta_{13} + F_{12} \cos\theta_{12}. \quad (7.4)$$

Т.е., чтобы сила поверхностного натяжения, действующая на каплю со стороны поверхности раздела «вторая жидкость-воздух» была меньше чем сумма двух других сил поверхностного натяжения, действующих на каплю на границах раздела «капля-вторая жидкость» и «капля-воздух».

Но, учитывая, что сила поверхностного натяжения (6.6) прямо пропорциональна длине границе раздела между средами $F_{n,n} = \sigma \cdot L$, то, подставляя ее в не-

равенство (7.4), получим неравенство, при котором капля жидкости не будет растекаться на поверхности второй жидкости:

$$\sigma_{23} \leq \sigma_{12} + \sigma_{13}. \quad (7.5)$$

Т.е. капля не будет растекаться, если коэффициент поверхностного натяжения второй жидкости меньше, чем сумма коэффициентов поверхностного натяжения капли на ее границах раздела с воздухом и со второй жидкостью.

И наоборот, если неравенство (7.5) не выполняется, т.е.:

$$\sigma_{23} > \sigma_{12} + \sigma_{13}, \quad (7.6)$$

то капля будет растекаться по поверхности второй жидкости в виде пленки (силы поверхностного натяжения, действующие со стороны поверхности второй жидкости будут как бы «разрывать» каплю).

Многие органические жидкости (эфир, скипидар, керосин) растекаются по поверхности воды. Для некоторых жидкостей (бензол, жирные кислоты масла) растекание наблюдается для первых капель, помещенных на поверхность чистой воды. Последующие капли уже не растекаются, а остаются на поверхности в виде устойчивых капель из-за того, что первые капли, растекаясь, достаточно уменьшают поверхностное натяжение. Таким образом, растворяя даже небольшое количество примесей в растворителе, можно влиять на его коэффициент поверхностного натяжения и, следовательно, «управлять» процессом растекания или не растекания по его поверхности других жидкостей.

Ленгмюр и Дево предложили метод определения размеров молекул касторового масла, основанный на растекании капли масла по поверхности воды.

Экспериментально установлено, что если поверхность воды достаточно велика, то капля масла соответствующего объема растекается в очень тонкий мономолекулярный слой, т.е. слой толщиной в одну молекулу. Если капля касторового масла упадет на поверхность воды, окрашенной марганцовкой, то, растекшись по ней, она становится хорошо видна.

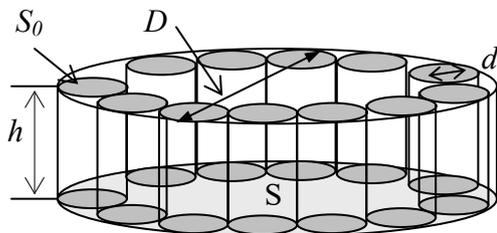


Рис.7.6

Растекшись по поверхности воды, капля касторового масла в идеальном случае принимает форму круглого пятна площадью S (Рис.7.6). Измерив линейкой диаметр образовавшегося круглого пятна D , можно найти площадь его поверхности:

$$S = \pi \frac{D^2}{4}. \quad (7.7)$$

Молекулу масла (жирных кислот) можно рассматривать как образование, сильно вытянутое в длину, нечто вроде цилиндра. Форму молекулы масла будем считать цилиндрической. Тогда площадь кругового поперечного сечения молекулы:

$$S_0 = \pi \frac{d^2}{4}, \quad (7.8)$$

где d - диаметр молекулы касторового масла.

В мономолекулярном слое молекулы масла расположены вертикально. Предполагая, что молекулы масла плотно расположены в мономолекулярном слое, как на рис 7.6, можно найти число молекул в мономолекулярном слое, используя выражения (7.7) и (7.8):

$$N = \frac{S}{S_0} = \frac{D^2}{d^2}. \quad (7.9)$$

Но, с другой стороны, число молекул в капле мы можем найти как произ-

ведение числа молей $n = \frac{m}{\mu}$ на число Авогадро – число молекул в одном моле

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, \text{ т.е.} \quad N = n \cdot N_A = \frac{m}{\mu} \cdot N_A, \quad (7.10)$$

где m – масса капли; $\mu = 0,894$ кг/моль – молярная масса касторового масла.

Приравнивая (7.9) и (7.10), получим: $\frac{m \cdot N_A}{\mu} = \frac{D^2}{d^2}$. Откуда выразим диа-

метр молекулы касторового масла:
$$d = D \sqrt{\frac{\mu}{m \cdot N_A}}. \quad (7.11)$$

Высота молекулы равна толщине мономолекулярного слоя. А толщину цилиндрического слоя мы можем найти из его объема: $V = S \cdot h$. Тогда:

$$h = \frac{V}{S}. \quad (7.12)$$

Но объем капли касторового масла можно найти, зная массу m капли и плотность масла $\rho = 970$ кг/м³: $V = \frac{m}{\rho}$. (7.13)

Подставляя (7.13) и (7.7) в (7.12), получим высоту молекулы – толщину

мономолекулярного слоя:
$$h = \frac{V}{S} = \frac{\frac{m}{\rho}}{\pi \frac{D^2}{4}} = \frac{4m}{\pi \rho D^2}. \quad (7.14)$$

Порядок выполнения работы

1. Наполнить ванночку водой, добавить в нее марганцовку. Выполняя помешивание раствора стеклянной палочкой добиться равномерного светло-розового цвета.
2. Определить массу чистого химического стаканчика m_1 , а затем массу того же стаканчика m_2 с $n=20$ каплями касторового масла. Найти массу одной капли по формуле:
$$m = \frac{m_2 - m_1}{n}.$$
3. Из пипетки капнуть в ванночку три капли касторового масла с небольшой высоты в разных местах ванночки так, чтобы при растекании, капли не перемешались.
4. Как только капли перестанут растекаться, измерить диаметр пятен D .
5. Вычислить высоту мономолекулярного слоя масла по формуле (7.14).
6. Оценить погрешности измерений.
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу №1.

Таблица №1.

№	D , м	h , м	$\langle h \rangle$, м	Δh , м	$\langle \Delta h \rangle$, м	$h_{\text{исч}} = \langle h \rangle \pm \langle \Delta h \rangle$	ε , %
1							
2							
3							

8. Вычислить диаметр молекулы масла по формуле (7.11).
9. Оценить погрешности измерений.
10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу №2.

Таблица №2.

№	D , м	d , м	$\langle d \rangle$, м	Δd , м	$\langle \Delta d \rangle$, м	$d_{\text{учм}} = \langle d \rangle \pm \langle \Delta d \rangle$	ε , %
1							
2							
3							

Вычисления:

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. На основании рис.7.1 и 7.2 дайте определение явлений смачивания и не смачивания. Что такое краевой угол? Какие значения он принимает в случае смачивания и не смачивания?
2. На основании рис.7.3 и 7.4 поясните, как возникает дополнительное давление под искривленной поверхностью жидкости. Запишите формулу Лапласа для дополнительного давления. Поясните смысл знаков « \pm » в формуле Лапласа.
3. На основании рис.7.5 и формулы Лапласа (7.2) поясните механизм возникновения газовой эмболии.
4. На основании рис.7.5 и выражений (7.3-7.6) поясните условие растекания или не растекания капли на поверхности второй жидкости.
5. Сделайте вывод формул (7.11) и (7.14) для нахождения диаметра и высоты молекулы касторового масла.

Лабораторная работа №8

Определение теплоемкости твердых тел

Цель работы: изучить основные характеристики и виды термодинамических систем и процессов, закон сохранения энергии – первое начало термодинамики, определить молярную теплоемкость твердых тел.

Приборы и принадлежности: нагреватель, калориметр с мешалкой, термометр, два тела из различных материалов, весы.

Теория работы

Термодинамика – раздел физики, изучающий процессы превращения энергии при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое.

Термодинамическая система – это тело или группа тел, условно выделенные из окружающей среды, в которой происходят термодинамические процессы.

Различают три вида термодинамических систем:

- **изолированная** – которая не обменивается с окружающей средой ни энергией, ни веществом;
- **закрытая** – которая обменивается с окружающей средой энергией, но не обменивается веществом;
- **открытая** – которая обменивается с окружающей средой всеми параметрами: энергией и веществом.

Термодинамический процесс – это процесс перехода системы из одного состояния с параметрами P_1, V_1, T_1 в другое с параметрами P_2, V_2, T_2 , сопровождающийся превращением энергии из одного вида в другой или совершением механической работы.

Различают три вида термодинамических процессов:

- **обратимые** – при которых система, пройдя ряд изменений, возвращается в первоначальное состояние и при этом ликвидируются все последствия как в самой системе, так и в окружающей среде. Так как убрать последствия из окружающей среды невозможно, то необратимых процессов в природе не существует;
- **необратимые** – при которых не выполняются условия обратимости процесса, т.е. все процессы в природе;
- **циклические** – при которых сама система периодически возвращается в первоначальное состояние, но последствия в окружающей среде не ликвидируются. (По-сути, это особый вид необратимых процессов, например, циклы: день-ночь, смена пор года, физиологические циклы живых организмов и т.д.).

Любой термодинамический процесс сопровождается изменением энергии системы. Мерой изменения энергии является **количество теплоты ΔQ** (или δQ , если мы рассматриваем бесконечно малое изменение энергии системы).

$$\Delta Q = W_2 - W_1,$$

где W_1 и W_2 – энергия начального и конечного состояния системы соответственно.

При сообщении различным телам одинаковой массы извне одинакового количества теплоты ΔQ температура этих тел изменится на разную величину. Например, если мы нагреваем две сковороды одинаковой массы. Пусть одна из них стальная, а вторая – чугунная. По опыту мы знаем, что быстрее будет нагреваться стальная сковорода.

Способность тела изменять свою температуру при сообщении ему коли-

чества теплоты называется **теплоёмкостью**. Теплоёмкостью тела называется количество теплоты, которое необходимо передать телу, чтобы повысить его температуру на 1 К:

$$C = \Delta Q / \Delta T . \quad (8.1)$$

Размерность теплоёмкости: $[C] = \left[\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Для сравнения теплоёмкостей различных тел используют понятие **удельной теплоёмкости** c – теплоёмкости единицы массы вещества:

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad (8.2)$$

Размерность удельной теплоёмкости: $[c] = \left[\frac{\Delta Q}{m \Delta T} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Удельная теплоёмкость численно равна количеству теплоты, необходимому для нагревания тела массой 1 кг на 1 К.

Из определения теплоёмкости можно получить удобную на практике формулу для нахождения **количества тепла**, необходимого для изменения температуры тела на заранее заданную величину ΔT :

$$\Delta Q = c m \Delta T . \quad (8.3)$$

Молярная теплоёмкость - количество теплоты, которое необходимо сообщить одному молю вещества для увеличения его температуры на 1 К:

$$C_{\mu} = \frac{\Delta Q}{n \cdot \Delta T} , \quad (8.4)$$

где $n = m/\mu$ - количество молей вещества; μ - молярная масса.

Размерность молярной теплоёмкости: $[C_{\mu}] = \left[\frac{\Delta Q}{n \cdot \Delta T} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Сравнивая формулы удельной и молярной теплоёмкостей, находим, что:

$$C_{\mu} = \mu \cdot c . \quad (8.5)$$

Определив удельную теплоёмкость, можно вычислить и молярную теплоёмкость.

Дюлонгом и Пти экспериментально был установлен закон, согласно которому молярные теплоёмкости всех твердых тел при достаточно высоких температурах одинаковы и равны:

$$C_{\mu} = 3R , \quad (8.6)$$

где R - универсальная газовая постоянная.

Каждое вещество имеет свою температуру, выше которой молярная теплоёмкость не зависит от температуры и равна $3R$.

Что будет происходить с системой, например, газом при сообщении ему количества теплоты ΔQ ?

Здесь можно условно выделить два механизма:

Первый механизм

При сообщении $\Delta Q > 0$ увеличивается температура тела. (Выражение $\Delta Q > 0$ означает, что изменение теплоты – это положительная величина, т.е. тело нагревается. Если бы ΔQ было < 0 , то это значило бы, что тело остывает). Т.к. температура тела увеличивается, то $\Delta T > 0$. Но из молекулярной физики известно, что от температуры зависит внутренняя энергия вещества: $U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT$, где i –

число степеней свободы газовых молекул. Т.к. происходит изменение температуры тела $\Delta T > 0$, то будет происходить и изменение внутренней энергии:

$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$. Причем, при увеличении температуры тела внутренняя энергия

также увеличивается - $\Delta U > 0$. Что при этом происходит на микроскопическом уровне? Вспомним из МКТ, что внутренняя энергия, например, идеального газа – это сумма кинетических энергий всех его молекул - $U = \sum W_k$. Т.к. внутренняя энергия газа увеличивается, то увеличиваются и кинетические энергии молекул, т.е. увеличивается скорость их теплового хаотического движения.

Второй механизм

Давление газа зависит от средней кинетической энергии молекул $p = \frac{2}{3} n_0 \bar{W}_k$, где n_0 – концентрация молекул. При увеличении кинетической энергии возрастает и давление, оказываемое газом на стенки сосуда. Но давление, по определению: $p = \frac{F}{S}$, откуда $F = pS$. Таким образом, при увеличении давления возрастает сила, с которой молекулы действуют на стенки сосуда, в котором находится газ. Если на стенки сосуда действует сила, то по второму закону Ньютона $F = ma$ может возникнуть ускорение, т.е. движение стенок сосуда. При этом говорят, что газ совершает работу по расширению.

Эти два механизма объединяются **законом сохранения энергии**, который в термодинамике называется **первым началом термодинамики**:

$$\Delta Q = \Delta U \pm \Delta A \quad (8.7)$$

- количество теплоты, сообщаемое термодинамической системе, расходуется на увеличение внутренней энергии системы и совершение системой работы против внешних сил.

Если сама система совершает работу, то работа положительна: $+A > 0$, если над системой совершается работа, то она отрицательна: $-A < 0$.

Пусть, например, при обратимом процессе сама система возвращается в первоначальное состояние. Это значит, что ее внутренняя энергия не изменяется, т.е. изменение внутренней энергии $\Delta U = 0$. Подставляя в первое начало термодинамики, получим:

$$\Delta Q = \Delta A \quad (8.8)$$

Но, т.к. обратимых процессов в природе не существует, то выражение (8.8) трактуется как **невозможность создания вечного двигателя первого рода**: система может совершить в лучшем случае только такую работу, какое количество тепла ей передано. Это значит, что невозможно, один раз передав системе энергию, получить вечно работающий механизм, совершающий работу больше, чем переданная ему теплота.

Методика определения удельной теплоемкости твердых тел в данной работе основана на использовании закона сохранения энергии при тепловом обмене, который называется **уравнением теплового баланса** при условии, что тепло не рассеивается в окружающую среду, т. е., что система замкнута.

Нагреем твердое тело и опустим его в воду, налитую в калориметр. Твердое тело будет остывать, отдавая некоторое количества теплоты ΔQ_1 стаканчику калориметра и воде, которые, в свою очередь, получают от нагретого тела количество теплоты ΔQ_2 и ΔQ_3 , нагреваясь при этом. В результате, в термодинамической системе «калориметр – вода - твердое тело» устанавливается состояние термодинамического равновесия при некоторой равновесной температуре T . Тогда уравнение теплового баланса для системы примет вид:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + \Delta Q_3 \quad (8.9)$$

Твердое тело массой m_1 с удельной теплоемкостью c_1 и нагретое до температуры T_1 , остывая до температуры равновесия T , отдает количество теплоты ΔQ_1 , которое можно определить по формуле (8.3):

$$\Delta Q_1 = m_1 c_1 (T_1 - T). \quad (8.10)$$

Стаканчик калориметра (внутренний стаканчик) массой m_2 с удельной теплоемкостью c_2 нагревается от температуры T_2 до температуры равновесия T , принимая количество теплоты ΔQ_2 :

$$\Delta Q_2 = m_2 c_2 (T_2 - T). \quad (8.11)$$

Вода массой m_3 с удельной теплоемкостью c_3 , налитая в стаканчик калориметра также нагревается от температуры T_2 до температуры равновесия T принимая количество теплоты ΔQ_3 :

$$\Delta Q_3 = m_3 c_3 (T_3 - T). \quad (8.12)$$

Подставим (8.10), (8.11), (8.12) в уравнение теплового баланса (8.9):

$$c_1 m_1 (T_1 - T) = c_2 m_2 (T - T_2) + c_3 m_3 (T - T_2). \quad (8.13)$$

Раскрывая скобки, получим: $c_1 m_1 (T_1 - T) = c_2 m_2 T - c_2 m_2 T_2 + c_3 m_3 T - c_3 m_3 T_2$.

Скомпонуем слагаемые: $c_1 m_1 (T_1 - T) = (c_2 m_2 + c_3 m_3) T - (c_2 m_2 + c_3 m_3) T_2$.

Вынесем $(c_2 m_2 + c_3 m_3)$ за скобки: $c_1 m_1 (T_1 - T) = (c_2 m_2 + c_3 m_3) (T - T_2)$.

Откуда, удельная теплоемкость исследуемого твердого тела:

$$c_1 = \frac{(c_2 m_2 + c_3 m_3) (T - T_2)}{m_1 (T_1 - T)}. \quad (8.14)$$

Определение удельной теплоемкости алюминия

Для того, чтобы вычислить удельную теплоемкость любого твердого тела по формуле (8.14), необходимо сначала измерить удельную теплоемкость c_2 внутреннего стаканчика калориметра. Так как внутренний стаканчик калориметра изготовлен из алюминия, то в начале мы можем в качестве исследуемого использовать алюминиевое тело. В таком случае удельные теплоемкости исследуемого тела и внутреннего стаканчика калориметра одинаковы, т.е. $c_2 = c_1$. Тогда уравнение (8.13) примет вид: $c_2 m_1 (T_1 - T) - c_2 m_2 (T - T_2) = c_3 m_3 (T - T_2)$.

Собирая слагаемые с c_2 в одной стороне равенства и вынося c_2 за скобки, получим:

$$c_2 [m_1 (T_1 - T) - m_2 (T - T_2)] = c_3 m_3 (T - T_2).$$

Откуда выразим удельную теплоемкость алюминия:

$$c_2 = \frac{c_3 m_3 (T - T_2)}{m_1 (T_1 - T) - m_2 (T - T_2)}. \quad (8.15)$$

Определение удельной теплоемкости латуни

Так как удельную теплоемкость алюминия мы уже определили по формуле (8.15), то по формуле (8.14) можно вычислить удельную теплоемкость любого, например, латунного тела, которое используется в данной работе.

Порядок выполнения работы

Задание №1. Определение удельной и молярной теплоемкости алюминия

1. Определить массу тела m_1 из алюминия. Определить массу внутреннего стаканчика калориметра m_2 .
2. Опустить за нить алюминиевое тело в нагреватель с кипящей водой на 5 мин. За это время исследуемое тело нагреется до температуры кипящей воды $t_1 = 100^\circ\text{C}$.
3. Налить $m_3 = 200$ г. холодной воды из под крана во внутренний стаканчик калориметра и измерить ее температуру t_2 .
4. Нагретое тело сразу перенести за нить в калориметр и перемешать воду для выравнивания температур тела и воды. Закрыть калориметр крышкой. Опу-

- стить термометр в калориметр, вставив его в крышку калориметра.
- Наблюдать за показаниями термометра. В момент, когда температура прекратит увеличиваться, измерить температуру воды в калориметре t – это и есть температура термодинамического равновесия.
 - Найти удельную теплоемкость алюминия по формуле (8.15), где удельная теплоемкость воды $c_3 = 4186 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.
 - Опыт повторить два раза.
 - ВНИМАНИЕ:** Все значения температуры по шкале Цельсия перевести в градусы по шкале Кельвина по формуле:

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.$$

- Вычислить среднее значение, абсолютную и относительную погрешность измерения удельной теплоемкости. Записать истинное значение теплоемкости.
- Вычислить молярную теплоемкость алюминия C_{μ} по формуле (8.5), используя значение молярной массы алюминия $\mu_{Al} = 0,027 \text{ кг/моль}$.
- Данные измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№	m_1 , кг	m_2 , кг	m_3 , кг	T_1 , К	T_2 , К	T , К	c_2 , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\langle c_2 \rangle$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	Δc_2 , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\langle \Delta c_2 \rangle$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	ε , %
1											
2											
$c_2 =$											
$C_{\mu} =$											

- Сравнить полученное значение удельной теплоемкости алюминия с известным табличным значением: $c_{Al} = 896 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.
- Проверить для алюминия закон Дюлонга и Пти (8.6). Сделать вывод.

Вычисления к заданию №1:

Вывод:

Задание №2. Определение удельной и молярной теплоемкости латуни

1. Выписать из задания №1 полученное среднее значение удельной теплоемкости алюминия $\langle c_2 \rangle$.
2. Провести измерения, аналогичные пунктам 1-9 задания №1, используя в качестве исследуемого тела из латуни.
3. Найти удельную теплоемкость латуни по формуле (8.14), где удельная теплоемкость воды $c_3 = 4186 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.
4. Вычислить молярную теплоемкость латуни C_μ по формуле (8.5), используя значение молярной массы латуни $\mu_{\text{лат}} = 0,129 \text{ кг/моль}$.
5. Данные измерений и вычислений занести в таблицу 2.
Удельная теплоемкость алюминия: $\langle c_2 \rangle =$ _____

Таблица 2.

№	m_1 , кг	m_2 , кг	m_3 , кг	T_1 , К	T_2 , К	T , К	c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\langle c \rangle$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	Δc , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\langle \Delta c \rangle$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	ε , %
1											
2											
$c =$											
$C_\mu =$											

6. Сравнить полученное значение удельной теплоемкости латуни с известным табличным значением: $c_{\text{лат}} = 386 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.
7. Проверить для латуни закон Дюлонга и Пти (8.6). Сделать вывод.

Вычисления к заданию №2:

Вывод:

Контрольные вопросы защиты лабораторной работы:

1. Что изучает термодинамика? Что такое термодинамическая система, процесс? Какие бывают виды термодинамических систем, процессов?
2. Что такое количество теплоты? Запишите и сформулируйте Первое начало термодинамики. Объясните, что будет происходить с термодинамической системой при сообщении ей количества тепла (два механизма).
3. Запишите выражения и дайте определения теплоемкости, удельной и молярной теплоемкости.
4. Сформулируйте закон Дюлонга и Пти. Сравните полученные Вами значения молярных теплоемкостей алюминия и латуни с законом Дюлонга и Пти.
5. Запишите и объясните уравнение теплового баланса (8.9) для калориметрического метода. Сделайте вывод выражений (8.14) и (8.15) для определения удельных теплоемкостей латуни и алюминия.

Приложения

Приложение 1. Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Название приставки	Обозначение	Коэффициент умножения	Пример
Экса	Э	10^{18}	Эксаметр (Эм)
Пета	П	10^{15}	Петаметр (Пм)
Тера	Т	10^{12}	Тераджоуль (ТДж)
Гига	Г	10^9	Гигаом (ГОм)
Мега	М	10^6	Мегаом (МОм)
Кило	к	10^3	километр (км)
Гекто	г	10^2	гектоватт (гВт)
Дека	да	10^1	декалитр (дал)
Деци	д	10^{-1}	дециметр (дм)
Санتي	с	10^{-2}	сантиметр (см)
Милли	м	10^{-3}	миллиампер (мА)
Микро	мк , μ (греч. "мю")	10^{-6}	микровольт (мкВ, μ В)
Нано	н	10^{-9}	нанометр (нм)
Пико	п	10^{-12}	пикофарада (пФ)
Фемто	ф	10^{-15}	фемтометр (фм)
Атто	а	10^{-18}	аттокулон (аКл)

Примечание: при произношении ударение не должно приходиться на приставку.

Пример вычисления выражения, включающего значения физических величин со степенями числа 10

Пусть измерены некоторые физические величины X_1 , X_2 и X_3 . Значения этих величин, например: $X_1 = A \cdot 10^{15}$, $X_2 = B \cdot 10^{-38}$ и $X_3 = C \cdot 10^6$, где A , B и C - любые вещественные числа.

Пусть далее вам необходимо вычислить некоторое выражение, в которое входят все данные величины X_1 , X_2 и X_3 , например: $F = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$.

Подставив в выражение измеренные значения X_1 , X_2 и X_3 , получим:

$$F = \frac{A \cdot 10^{15} \cdot B \cdot 10^{-38}}{C \cdot 10^6}$$

Т.к. бессмысленно и невозможно ввести в калькулятор, например 38 нулей, то воспользуемся правилами, согласно которым:

1. при перемножении степеней показатели степени складываются;
2. при делении степеней показатели степени вычитаются;
3. при возведении степени в степень показатели степени перемножаются.

$$\text{Тогда } F = \frac{A \cdot 10^{15} \cdot B \cdot 10^{-38}}{C \cdot 10^6} = \frac{A \cdot B}{C} \cdot \frac{10^{15} \cdot 10^{-38}}{10^6} = \frac{A \cdot B}{C} \cdot 10^{-29}.$$

Вычислив при помощи калькулятора выражение $\frac{A \cdot B}{C}$, окончательный результат необходимо помножить на 10^{-29} .

Приложение 2. Основные физические константы в СИ

Название	Символ	Значение
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$2,99793 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,022252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31510 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Фарадея	F	$9,6487 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6,62491 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5,6607 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная Вина	b	$2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Заряд электрона	e	$1,60021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	m_e	$9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	m_p	$1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Приложение 3. Связь между различными системами измерения

Связь между различными системами измерения температуры

Шкала Цельсия	$t_{\text{крист. воды}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кипен. воды}} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$
Шкала Фаренгейта	$t_{\text{крист. воды}} = 32 \text{ } ^\circ\text{F}$	$t_{\text{кипен. воды}} = 212 \text{ } ^\circ\text{F}$
Связь шкалы Цельсия и Фаренгейта	$\frac{t \text{ } ^\circ\text{C}}{100} = \frac{t \text{ } ^\circ\text{F} - 32}{180}$ или $t \text{ } ^\circ\text{F} = 1,8 \cdot t \text{ } ^\circ\text{C} + 32^\circ$	
Шкала Кельвина	$t_{\text{крист. воды}} = 273,15 \text{ } ^\circ\text{K}$	$t_{\text{кипен. воды}} = 373,15 \text{ } ^\circ\text{K}$
Связь шкалы Цельсия и Кельвина	$T \text{ } ^\circ\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$	

Англо-американские внесистемные единицы измерения

Русское название	Англо-американские единицы	Метрические единицы
Меры длины		
1 миля (сухопутная)	1 760 ярдов	1 609 м
1 миля (морская)	6 080 футов	1 852,2 м
1 ярд	3 фута; 36 дюймов	91,44 см
1 фут	12 дюймов	304,8 мм
1 дюйм	0,0833 фута	25,4 мм
1 кабельтов	-	185,32 м
Меры площади		
1 акр	4 840 кв. ярдов	4 047 кв. м.
1 кв. миля	640 акров	258,99 га

Русское название	Англо-американские единицы	Метрические единицы
Меры жидких тел		
1 баррель	34,97 бр. галлон	158,988 л
	42 галлона США	
1 галлон США	4 кварты, 8 пинт США; 128 жидк. унций	3,785 л
1 кварта США	2 пинты США	0,94625 л
1 пинта США	16 жидк. унций,	0,47312 л
1 британский галлон	4 бр. кварты, 8 бр. пинт	4,546 л
1 британская кварта	2 бр. пинты	1,1365 л
1 британская пинта	1,2 пинты США	0,5682 л
1 жидкая унция	-	0,028 л
Меры сыпучих тел		
1 кварта США	2 пинты США	1,101 л
1 пинта США	0,97 бр. кварты	0,5506 л
1 британская кварта	2 бр. пинты	1,1365 л
1 британская пинта	1,03 пинты США	0,5682 л
Меры веса		
1 стоун	14 фунтов	6,35 кг
1 фунт коммерческий	16 унций	453,6 г
1 унция коммерческая	16 драхм	28,35 г
1 драхма коммерческая	27,34 грана	1,772 г
1 гран коммерческий	-	64,8 мг
1 фунт тройский и аптекарский	12 унций, 96 драхм, 5760 гран	373,27 г
1 унция тройская и аптекарская	8 драхм, 480 гран	31,106 г
1 драхма аптекарская	60 гран	3,89 г
1 гран аптекарский	-	64,8 мг

Литература

1. Белановский, А.С. Основы биофизики в ветеринарии: учеб. пособие для студентов по специальности «Ветеринарная медицина» / А.С. Белановский. – М.: Агропромиздат, 1989. – 271 с.: ил.
2. Березовский, В.А. Биофизические характеристики тканей человека: справочное руководство / В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 185 с.: интеграл.
3. Грабовский, Р.И. Курс физики: учеб. пособие для высших сельскохозяйственных вузов / Р.И. Грабовский. – изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 605 с.: ил.
4. Ливенцев, Н.М. Курс физики для медвузов: учебник / Н.М. Ливенцев. – изд. 5-е, переб. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 648 с.:ил.
5. Ремизов, А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медвузов: учебник / А.Н. Ремизов. – М.: Высш. шк., 1982. – 607 с.: ил.
6. Механика. Молекулярная физика и термодинамика : рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентами биологического факультета / О.В. Пышненко [и др.]. – Витебск: УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2009. – 84 с.

Учебное издание

ПЫШНЕНКО Олег Викторович

ЯХНОВЕЦ Андрей Анастасьевич

БОГДАНОВА Вера Павловна

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Физика» студентами факультета химико-биологических
и географических наук

Технический редактор

Г.В. Разбоева

Компьютерный дизайн

Л.Р. Жигунова

Подписано в печать 26.01.2022. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,99. Тираж 39 экз. Заказ в/п.

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.