Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УР
_____ А.М. Дигурова
«30» 08 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Молекулярная физика (практикум)»

Направление 03.03.02 Физика

Профиль: " Физика конденсированного состояния "

Квалификация (степень) выпускника – бакалавр

Форма обучения – очная

(год начала подготовки 2017г.)

Владикавказ 2020

Программа составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению **03.03.02 Физика,** утвержденным приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 07. 08. 2014 г. № 937, учебным планом подготовки бакалавра по направлению **03.03.02 Физика,** утвержденным Ученым советом ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова» от 30.04. 2020 г., протокол № 9.

Составитель: Елканова Т.М., доцент кафедры физики и астрономии

Рабочая программа обсуждена и утверждена на заседании кафедры физики и астрономии (протокол № 10 от 25 июня 2020 г.)

Зав.кафедрой_____А.М. Туриев

Одобрена Советом физико-технического факультета

(протокол №7 от «29» июня 2020 г.)

Председатель_____И.В. Тваури

1. Место дисциплины в структуре ОПОП.

Дисциплина «Молекулярная физика» (физпрактикум) относится к дисциплинам Блока 1 базовой части Б1.Б.8.3.

2. Объем дисциплины: 2 зачетные единицы.

3. Содержание дисциплины.

Задачи изучения дисциплины:

- применять теоретический материал курса общей физики к анализу конкретных физических ситуаций;
- экспериментально изучить основные физические закономерности, понимать границы их применимости;
- формировать умения самостоятельно приобретать и применять знания, объяснять физические явления; привить навыки самостоятельной работы
  по предмету;
- ознакомление с измерительными приборами, научной аппаратурой, изучение принципов их работы;
- формирование экспериментальных умений;
- научить применять математические методы обработки результатов эксперимента (в том числе с применением ЭВМ), научить правильно представлять полученную экспериментальную информацию в виде графиков, таблиц.

Содержание дисциплины

Тема № **1. Идеальные и реальные газы**.

Лабораторная работа **№2.** Определение молекулярной массы и плотности газа методом откачки

Лабораторная работа **№3.** Определение критической температуры паров эфира**.**

Тема **№2. Явления переноса**.

Лабораторная работа **№4.** Определение длины свободного пробега молекул и коэффициента внутреннего трения воздуха

Лабораторная работа **№5.** Определение коэффициента теплопроводности методом нагретой нити

Лабораторная работа **№6.** Определение вязкости воздуха капиллярным методом**.**

Лабораторная работа **№7.** Определение коэффициента внутреннего трения воды**.**

Лабораторная работа **№8.** Определение коэффициента теплопроводности песка**.**

Тема **№3. Элементы термодинамики**.

Лабораторная работа **№9.** Определение отношения CP/C**V** методом Клемана и Дезорма

Лабораторная работа **№10.** Определение отношения CP/C**V** методом стоячих звуковых волн

Лабораторная работа **№11.** Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянных давлении и объеме резонансным методом

Лабораторная работа **№12.** Определение приращения энтропии при плавлении олова**.**

Тема **№4. Свойства жидкостей**.

Лабораторная работа **№14.** Определение коэффициента объемного расширения керосина

Лабораторная работа **№15.** Определение коэффициента поверхностного

168

натяжения жидкости методом отрыва кольца

Лабораторная работа **№16.** Определение коэффициента поверхностного натяжения раствора по методу максимального давления в пузырьке

Лабораторная работа **№17.** Определение влажности воздуха**.**

Тема **№5. Твердое тело**.

Лабораторная работа **№18.** Изучение свойств кристаллических и аморфных тел

Лабораторная работа **№19.** Определение среднего коэффициента линейного расширения твердых тел**.**

Лабораторная работа **№20.** Определение теплоемкости металлов методом охлаждения**.**

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине.

В результате освоения дисциплины студенты должны овладеть следующими **навыками:**

- при работе в лабораторном практикуме строго соблюдать правила охраны труда и технику безопасности;
- самостоятельно добывать необходимые знания, работая с учебной и справочной литературой;
- владеть основными приемами выполнения эксперимента в практикуме;
- четко и последовательно формулировать и решать поставленные перед ними задачи, как теоретического, так и прикладного характера.

5. Форма контроля: зачет.

Методические указания по подготовке к лабораторным работам

Переход российской системы образования к ГОС ВПО третьего поколения означает перестройку образовательной политики и практики работы учебных заведений профессионального образования в соответствии с компетентностным и студентоцентрированным подходами. Компетентностный подход означает создание условий для овладения комплексом компетенций, означающих потенциал, способность выпускника к выживанию и устойчивой жизнедеятельности в условиях современного многофакторного пространства. Такой подход выдвигает на первое место не информированность студента, а умение решать проблемы, возникающие в познании и объяснении явлений действительности, и предполагает необходимость: развития способности решать задачи на основе знаний, опыта, мотивации и ценностных ориентаций, умения самостоятельно добывать необходимые знания; формирования навыков самостоятельной постановки целей деятельности и планирования способов их достижения, что подразумевает развитие творческой самостоятельности и познавательной активности студентов. Физический практикум может служить одним из средств формирования у студентов общепрофессиональных, специальных и гуманитарно-ориентированных компетенций, способствуя развитию навыков комплексного подхода к изучению физических процессов и явлений и формированию целостного и научного представления о процессах и явлениях, происходящих в мире природы и общества.

Подготовка студента к выполнению лабораторной работы начинается с самостоятельного выполнения «**базис-конспекта**», который включает в себя:

1. Краткое описание цели работы, возможных способов достижения этой цели и опенку выбранного способа.
2. Описание физической сущности метода, лежащего в основе выполненного в лабораторной работе исследования.
3. Перечень измерительных приборов, необходимых для выполнения лабораторной работы, с указанием типа и пределов измерения приборов (составляется по условию и требованию экспериментальной задачи); правила техники безопасности при работе с выбранными приборами.

4. Очень краткие ответы на вопросы по теоретическому материалу, в обязательном порядке содержащие определения изучаемых в работе физических величин с указанием единиц измерения.
5. Указание областей науки, техники, окружающей действительности, в которых встречаются и применяются изучаемые в работе явления, краткий анализ их теоретического и практического значения с указанием важных в выбранной студентом профессии аспектов.
6. Описание математических методов обработки полученных в работе результатов, перечень таблиц (с указанием измеряемых и рассчитываемых по результатам измерений величин), графиков, расчетных формул.
7. Прогноз ожидаемых результатов, составленный на основе теоретического обоснования работы.

После выполнения лабораторной работы составляется письменный отчет в соответствии с приведенным ниже эвристическим предписанием.

Оформление отчета по лабораторной работе

1. Оформление результатов лабораторной работы начинается с записи даты проведения эксперимента и его названия.
2. Далее следует конкретизировать цель эксперимента.
3. Необходимо привести перечень использованных приборов и принадлежностей с указанием марок и технических характеристик (типа приборов, класса точности, пределов измерений и т. д.).
4. Перед тем, как приступить к опыту, необходимо подготовить таблицу для записи результатов измерений и вычислений.
5. Численные величины с точным указанием единиц измерения после их нахождения должны быть занесены в заранее подготовленную таблицу. Без единиц измерения результат бесцелен.
6. В записях, насколько это возможно, должны использоваться схемы установок, схематические рисунки приборов и установок в действии.
7. Где это целесообразно, результаты должны быть представлены в виде графиков. Ценность графического изображения состоит в том, что он уменьшает возможность появления грубой ошибки и позволяет лучше осмыслить физическую сущность полученных результатов в целом.
8. Необходимо привести в отчете пример расчета измеряемой величины, программы и результаты расчета погрешностей измерений.
9. Записи, вычисления, графики, таблицы, схемы должны выполняться так, чтобы другим было понятно, с какой целью это было сделано, как сделано и что из этого получилось.
10. Конечный результат с рассчитанной погрешностью необходимо проанализировать: правдоподобен ли он? Не противоречит ли он физическому смыслу? Правильны ли

единицы измерения конечного результата? Нельзя ли конечный результат сравнить с какими-либо константами, справочными данными?

11. Последним пунктом отчета являются выводы. Выводы по работе должны содержать то новое, что студенты узнали во время выполнения работы; сопоставление теоретических предсказаний и экспериментальных результатов; анализ факторов, влияющих на расхождение между теоретическими и экспериментальными данными; критические замечания и предложения по методике работы, соображения по обоснованности применяемых методов и достоверности результатов.

При подготовке и выполнении лабораторных работ рекомендуем использовать приведенные ниже эвристические предписания общего и частного характера.

I. **Как правильно наблюдать и описывать наблюдаемые явления, процессы**

1. Осмыслите цель наблюдения, а для этого поставьте перед собой вопрос: для чего проводится наблюдение?
2. Уточните предмет наблюдения. В связи с этим поставьте перед собой вопрос: что будете наблюдать?
3. Наблюдение осуществляйте по заранее разработанному плану. Для этого представьте его мысленно или запишите предварительно в тетради.
4. До начала наблюдения определите, когда будете осуществлять фиксацию наблюдаемых явлений: в процессе наблюдения или сразу же после его окончания.
5. Выберите способ наблюдения; наблюдать можно прямым способом, т. е. визуально, или косвенным способом, т. е. при помощи приборов (фотоаппарата, магнитофона и т. д.).
6. Наблюдение, как и эксперимент, необходимо проводить несколько раз; это повышает его объективность.
7. При описании явлений, процессов обращайте внимание не только на то, как они протекали во времени, но и при каких условиях.
8. Помните, что цель описания — указать наиболее точно и полно признаки наблюдаемых явлений, предметов.
9. При описании результатов наблюдений обратите внимание на то, что существенно нового было обнаружено и что общего, сходного с ранее известным.
10. Описание наблюдаемых явлений, процессов может быть выражено в словесной форме, представлено аналитически — в виде формул и уравнений, графически — в виде рисунков, схем и т. д.

II. **Как составлять план проведения эксперимента**

1. Уточните и конкретизируйте конечную цель проведения эксперимента. Для этого еще раз осмыслите условие и требование задания. Поставьте перед собой вопросы: что дано? Что нужно экспериментально проверить, получить? Каковы возможные условия выполнения эксперимента?

2. Вычлените промежуточные цели проведения эксперимента. Для этого мысленно разбейте задачу на подзадачи.
3. Мысленно представьте все возможные варианты проведения эксперимента.
4. Выберите из всех возможных вариантов проведения эксперимента наиболее рациональные с точки зрения возможности получить наиболее точный результат при использовании минимума приборов и материалов, с точки зрения минимальной затраты времени.
5. Запись плана эксперимента должна быть по возможности краткой, отражающей лишь основные его этапы.
6. Предусмотрите, какие таблицы, рисунки, схемы вам необходимо будет выполнить в процессе эксперимента.
7. Продумайте, когда и что вам придется измерить в процессе эксперимента, а что можно вычислить после его выполнения.
8. Продумайте и предусмотрите в плане, какие приемы и средства могут быть вами использованы.
9. После составления плана проанализируйте его еще раз. Для этого представьте себе мысленно работу от начала до конца; от конца к началу.
10. Помните, что хорошо составленный план должен обладать и определенной гибкостью, т. е. возможностью определенной перестройки ваших действий в случае возникновения затруднения.

III. **Как подобрать приборы и материалы, необходимые для эксперимента**

1. Вначале, насколько это возможно, определите по условию и требованию экспериментальной задачи, какие приборы и материалы потребуются. Составьте их предварительный перечень.
2. Затем уточните этот перечень, проанализируйте схему установки и условия ее работы; уточните все этапы выполнения плана предстоящего эксперимента, все то, что предстоит наблюдать и измерять.
3. Для того, чтобы окончательно установить правильность выбранного прибора, необходимо с целями и условиями эксперимента соотнести: название прибора; назначение прибора; принцип действия прибора; предел измерения прибора; цену деления шкалы прибора; правила пользования прибором; условия эксплуатации прибора; правила техники безопасности при работе с прибором.
4. Для того, чтобы окончательно установить правильность выбранного материала, необходимо соотнести с целями и условиями эксперимента: название материала; назначение материала; основные физические и химические свойства материала; допустимые пределы изменения основных свойств материала; условия, в которых данным материал может быть использован; правила техники безопасности при работе с материалом.

IV. **Как собрать установку, схему для проведения эксперимента**

1. Приборы следую располагать так, чтобы ни один из них не перекрывал видимость и доступ к другому.
2. При расстановке приборов предусмотрите, чтобы одни приборы не влияли на работу других.
3. Учтите, что не все приборы могут быть установлены горизонтально, для некоторых рабочим состоянием является вертикальное положение.
4. Прежде чем приступить к сборке установки, схемы, проанализируйте и представьте ее мысленно в эксперименте, уточните, что необходимо наблюдать и измерять.
5. Шкала приборов и те участки установки, где вы проводите наблюдения за соответствующими физическими явлениями, должны находиться в поле лучшей видимости.
6. Используйте, где это возможно, вспомогательные приспособления: подставки, зажимы, прокладки, пинцеты, стрелки-указатели, фиксаторы и т. д.
7. После того, как приборы размещены, проверьте по возможности действие каждого прибора в отдельности.
8. После этого следует произвести настройку установки и проверить ее работу в целом
9. Все операции по сборке и использованию установки в работе должны проводиться в строгом соответствии с правилами техники безопасности.

V. **Как пользоваться измерительными приборами в процессе эксперимента**

1. Прежде чем использовать прибор в процессе эксперимента, познакомьтесь с его описанием, назначением и паспортными данными и по условным обозначениям на шкале определите систему прибора и его характеристики.
2. Непосредственно перед использованием прибора сравните допустимый предел измерения с максимально возможными значениями измеряемой величины.
3. Уточните цену деления шкалы прибора и убедитесь, что она соответствует точности измерения в проводимом измерении. Чтобы определить цену деления шкалы прибора, необходимо взять разность между двумя значениями шкалы и разделить ее на число делений, содержащихся между этими значениями.
4. Определите класс точности прибора и вычислите наибольшую погрешность, допускаемую прибором.
5. Расположите и установите прибор, учитывая особенности его конструкции и назначения, непосредственно перед его использованием в эксперименте.
6. При отсчете показаний прибора глаз располагайте против наблюдаемого деления, а луч зрения наблюдателя должен быть перпендикулярен плоскости шкалы прибора.
7. При записи результатов измерения сразу же запишите единицы измерения.
8. Проведите измерение одной и той же величины по возможности несколько раз.

VI. **На что следует обращать внимание при построении и чтении графиков**

1. Связь каких величин представляется на графике?
2. В каких единицах измерения указаны значения физических величин?
3. В каких пределах изменяются аргумент и функция?
4. Какой масштаб применен на осях координат?
5. Необходимо учитывать разброс экспериментальных точек, являющихся результатом приближенного характера данных, полученных в ходе измерения физических величин.
6. Каков характер функциональной зависимости, представленной графически?
7. Какие специфические особенности рассматриваемой функциональной зависимости вы можете отметить?
8. Можно ли подобрать аналитическое выражение, описывающее полученную функциональную зависимость?
9. Каков физический смысл как отдельных участков, так и всего графика в целом?

Список рекомендуемой литературы

1. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. СПб.: Лань, 2008.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учебное пособие. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 2001.
4. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. М.: Наука, 2000.
5. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. СПб.: Лань, 2009.
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Оникс, Мир и Образование, 2008.
7. Бурсиан Э. В. Физические приборы: Учебное пособие. М.: Просвещение, 1984.

ТЕМА №1

ИДЕАЛЬНЫЕ И РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Литература

[Р1]. Гл. I, V.
[Р2]. §§ 9 – 13, 20 – 32.
[Р3]. Гл. I, VIII.
[Р4]. Гл. 9, 14.
[Р6]. Гл. II.1, II.5.
[Р7]. Гл. II.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Основные величины, характеризующие свойства и состояние газа. Идеальный газ.

2. Число Авогадро. Число Лошмидта. Закон Авогадро
3. Давление газа. Основное уравнение кинетической теории идеальных газов.
4. Уравнение состояния идеального газа.
5. Законы идеального газа.
6. Скорости газовых молекул.
7. Броуновское движение.
8. Барометрическая формула. Закон Больцмана.
9. Экспериментальная проверка барометрической формулы Перреном. Определение числа Авогадро методом Перрена.
10. Отклонения свойств газов от идеальности. Силы межмолекулярного взаимодействия в реальном газе.
11. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ.
12. Критическое состояние. Критические параметры и методы их определения.
13. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Изотермы реальных газов. Понятие о фазовых переходах
14. Экспериментальное определение констант уравнения Ван-дер-Ваальса. Сравнение уравнения Ван-дер-Ваальса с данными опыта.
15. Сжижение газов (конденсация).

КАЧЕСТВЕННЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изменится ли высота полёта воздушного шара, если он в летний день попадает в тень от облака?
2. Чем объясняется наличие максимальной высоты для воздушного шара, которую он не в состоянии преодолеть?
3. Глубоководные рыбы при подъеме на поверхность воды гибнут: их внутренние органы разрываются. В чем причина этого явления? Для подъема на поверхность таких глубоководных рыб предложено применять специальные сачки. Какими основными свойствами они должны обладать?
4. Почему необходимо внести изменения в рецепт пирога, если его придется печь на высоте более 1000 м над уровнем моря? Какие это изменения?
5. В кабине летящего по орбите космического корабля поддерживается нормальное атмосферное давление, хотя воздух в кабине невесом, как и все находящиеся в ней тела? Объясните.
6. Фотографии молекул можно получать, но это трудно. Только ли в малых размерах молекул причины этих трудностей?
7. Скорости теплового движения многих молекул близки к скорости пули. Почему же даже очень чуткое обоняние диких животных не улавливает запах охотника, если он подкрадывается к ним против ветра?
8. Смесь жидкого кислорода с опилками, сажей, нафталином или углем представляют собой взрывчатое вещество. Почему?
9. Можно ли по методу Штерна определить скорость одной молекулы?
10. Почему чайник шумит перед закипанием воды в нём?
11. В кастрюле с тяжелой крышкой вскипятили воду. Кастрюлю сняли с плиты, после чего в спокойную воду насыпали чайную заварку. Вода бурно закипела. Объясните явление.

12. Почему баллоны со сжатым газом взрывоопасны, а труба с водой под большим давлением взрывобезопасна?
13. Со дна высокого стеклянного сосуда, наполненного водой, пускают небольшой пузырек воздуха и наблюдают за его движением. Каков характер его движения?
14. Почему из обычной бутылки, перевернутой отверстием вниз, вода выливается прерывистой струёй («булькая»), а из резиновой медицинской грелки — непрерывной струёй?
15. Почему от горящих поленьев с треском отскакивают искры?
16. Две колбы с воздухом при нормальном давлении, различные по объему, закупориваются и нагреваются в парах кипящей воды до 100° С. Одинаково ли будет в них давление воздуха после нагревания?
17. Почему сохраняется очень низкой температура жидкого воздуха (81 К) в сосуде Дьюара и низкая температура твердой углекислоты в ящике продавщицы мороженного в жаркий летний день? Почему твердая углекислота не тает, как растаял бы лед?
18. Если газ, нагретый выше критической температуры, сильно сжать, а затем дать ему возможность быстро расшириться, то на некоторое время появится туман, служащий признаком обращения газа в жидкое состояние. Отчего это происходит?
19. Рассматривая в микроскоп каплю крови, мы видим на фоне бесцветной жидкости красные кровяные тельца. Они не остаются в покое, а все время беспорядочно движутся. Объясните явление.
20. Имеются три непрозрачных цилиндра, закрытых подвижными поршнями. Известно, что в одном цилиндре находится газ при температуре выше критической, в другом — насыщенный, а в третьем — ненасыщенный пар. Как определить, что находится в каждом из цилиндров?
21. Что произойдет, если нагреть жидкость в плотничьем уровне до очень высокой температуры? Каков предел изменения размеров пузырька?

КАК ВЫ ДУМАЕТЕ

1. Какие факты служат доказательством реальности молекул?
2. Является ли температура абсолютной характеристикой системы или она относительна?
3. Меняется ли температура при переходе из одной системы отсчета в другую?
4. Зависит ли средняя скорость хаотического движения молекул от выбора системы отсчета?
5. Какими особенностями обладает тепловое движение в сравнении с механическим?
6. От чего зависят практические возможности человека в использовании законов молекулярно-кинетической теории вещества?
7. В рамках какой структуры условий справедливо уравнение Ван-дер-Ваальса?
8. Существуют ли в природе идеальные газы?
9. Можно ли абсолютно точно определить число Авогадро?
10. Какова степень общности универсальной газовой постоянной? В чем различие между частными и общими физическими константами?

11. В чем заключаются количественная и качественная стороны такой физической величины, как давление?
12. Каково отношение физических величин к тем объектам, явлениям, которые они характеризуют?
13. Какова модель идеального газа?
14. Какова система теоретических представлений, лежащих в основе экспериментов по исследованию молекулярных свойств вещества?
15. Почему в физическом исследовании необходимо применение метода идеализации?

Проверь себя!

1. При глубоких погружениях под воду всегда существует опасность кессонной болезни, при которой растворенный в крови и тканях тела азот образует пузырьки. Поэтому выход на поверхность производится постепенно, чтобы азот выходил из тканей без образования пузырьков. При этом
   a) всплытие производится равномерно, без остановок;
   b) самая большая остановка делается у поверхности;
   c) вначале всплытие производится медленно, а потом ускоряется.
2. Длина пузырька в трубке плотничьего уровня.
   a) не зависит от колебаний температуры
   b) в теплую погоду больше, чем в холодную, так как заключенный в нем газ расширяется.
   c) в теплую погоду меньше, чем в холодную, из-за теплового расширения жидкости.
3. Верхние слои атмосферы холоднее нижних вследствие того, что
   a) молекулы восходящего от нагретой поверхности земли воздушного течения замедляют свое движение по мере поднятия, а уменьшение скорости молекул и есть понижение температуры;
   b) воздух, поднимаясь вверх, затрачивает для совершения этой работы энергию, которую он заимствует из своего теплового запаса;
   c) воздух, поднимающийся вверх, охлаждается вследствие адиабатного расширения.
4. Водяной пар
   a) белого цвета;
   b) имеет цвет, зависящий от условий освещения;
   c) совершенно прозрачен и не имеет цвета.
5. Если воздушный шар в летний день попадет в тень от облака, то высота его полёта
   a) не изменится;
   b) увеличится;
   c) уменьшится.
6. Молекулы обладают большей кинетической энергией
   a) в водяном паре при 0 °С;
   b) в жидкой воде при 0 °С;
   c) во льду при 0 °С.

7. Пока жидкость не кипит, пузырьки пара, образующиеся у горячего дна сосуда, поднимаясь вверх,
   a) увеличиваются в размерах и лопаются;
   b) снова уменьшаются в размерах и могут исчезнуть;
   c) не изменяются в размерах, так как давление в них равно давлению насыщенных паров.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА АВОГАДРО

Цель работы: экспериментальное определение числа Авогадро и среднего радиуса броуновской частицы.

Приборы и принадлежности: микроскоп МБИ-2 с осветителем, набор предметных и покровных стекол, секундомер, фильтровальная бумага, пипетка, эмульсия.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Как показал в классической работе по изучению броуновского движения Перрен, число Авогадро можно определить из соотношения

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{-\frac{mg'(h_1-h_2)N}{RT}} \tag{1}$$

где n_1, n_2 —число частиц в единице объема на уровне h_1 и h_2,

g' —эффективное ускорение силы тяжести,

m—масса частиц.

Для частицы эмульсии, имеющей форму шарика, эффективный вес может быть вычислен по формуле:

$$mg' = 4/3\pi r^3 (\rho-\rho_0)g \tag{2}$$

где r — радиус частицы,

ρ — плотность вещества частицы,

ρ_0 —плотность среды.

Подставляя (2) в (1) и логарифмируя, получаем

$$N = \frac{3RT\ln(\frac{n_1}{n_2})}{4\pi r^3(\rho-\rho_0)g(h_2-h_1)} \tag{3}$$

Величины n_1, n_2, r, ρ, ρ_0, h_1, h_2 могут быть измерены. Измерить n_1, n_2 можно следующим способом.

Броуновские частицы эмульсии, как и молекулы газа, подчиняются закону распределения Больцмана, не зависящему от времени. Уменьшив с помощью диафрагмы поле зрения микроскопа так, чтобы в поле зрения сразу попадало малое число видимых зернышек (4—5), сосчитаем их, повторим такой подсчет достаточное число раз и просуммируем полученные значения. Одинаковое число измерений на разных уровнях позволит определить отношение n_1/n_2 . Диафрагмой может служить пластинка из фольги с отверстием, проколотым концом тонкой иглы, помещенная в фокальной плоскости окуляра.

Для правильного подсчета частиц требуется соблюдать следующие основные условия: число отсчета на уровне h_1 и h_2 должно быть строго одинаковым и достаточно большим (не меньше 150).

В качестве исследуемого объекта в данной задаче используется эмульсия канифоли в воде или в растворе спирта и воды. Если полученную эмульсию освободить от спирта, то она может сохраняться длительное время, частицы не слипаются. В случае присутствия спирта частицы канифоли укрупняются, и эмульсия через трое суток уже для работы непригодна.

Для получения эмульсии 10 см^3 2%-ного раствора канифоли в спирте вливают по каплям в 15 см^3 воды при тщательном помешивании. После суток отстоя наиболее крупные частицы выпадают в осадок. Слой эмульсии над осадком годен для опыта, ρ_0 для среды равно 0,95 г/см^3, ρ канифоли меняется от 1,01 г/см^3 до 1,09 г/см^3, поэтому перед составлением 2%-ного раствора рекомендуется ее определить.

Окуляр x20 снабжен диафрагмой и служит для отсчета частиц. Окуляр x15 имеет сетку и употребляется для определения среднего радиуса частиц. Работа ведется при светлом поле, осветитель обеспечивает равномерное и одинаковое освещение объекта в течение всей работы.

Так как работа ведется с иммерсионным слоем, то расстояние $h'_2 - h'_1$, измеряемое по барабану микроскопа, не равно расстоянию $h_2 - h_1$ в эмульсии. Следует ввести поправку, равную отношению показателей преломления n_1 эмульсии и n_2 иммерсии. Таким образом, истинное расстояние

$$h_2 - h_1 = \frac{n_1}{n_2}(h_2' - h_1') = \frac{1{,}35}{1{,}51}(h_2' - h_1')$$

Конечная расчетная формула имеет вид:

$$N = \frac{3RT\ln(\frac{n_1}{n_2})}{4\pi r^3(\rho - \rho_0)g\frac{1{,}35}{1{,}51}(h_2' - h_1')} \qquad (4)$$

Весь проведенный расчет применим к частицам строго одинакового размера. В эмульсии, приготовленной вышеописанным способом, имеются частицы разных размеров, причем кривая распределения частиц по величине имеет максимум. Положение этого максимума зависит от концентрации эмульсии и смещается в сторону больших радиусов при старении. Поэтому для расчета следовало бы пользоваться не средним арифметическим радиусом частицы, а наивероятнейшим, который всегда меньше среднего. Однако получить кривую распределения частиц эмульсии по размерам трудно, к тому же она меняется во времени. Приготовить эмульсии с частицами одинакового размера тоже сложно, поэтому получаемое по формуле (4) число Авогадро несколько занижено по абсолютной величине.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Установить микроскоп и осветитель на нужную яркость поля.
2. Положить на столик микроскопа кювету с эмульсией.
3. Взять объектив с шестидесятикратным увеличением (х 60) и с помощью слабого окуляра (х10) сфокусировать микроскоп на объект. Работать следует с иммерсионной жидкостью (кедровое масло с показателем преломления, равным показателю преломления стекла вносится между линзой осветителя и объектом и между объектом и объективом). Фокусировать следует осторожно, чтобы не повредить кювету, лучше из крайнего, нижнего положения объектива, выдвигая его вверх.
4. Заменить окуляр на рабочий (х20) с диафрагмой.
5. Приступить к счету частиц на данном уровне h_i (уровень замечают по делениям на барабане микрометрического винта).
6. Произвести счет числа частиц, находящихся в данный момент в поле зрения. Рекомендуется производить отсчеты через каждые 5 сек (это время может быть производным, так как распределение частиц стационарно).
7. Сделать не менее 150 отсчетов.
8. Микрометрическим винтом переместить вертикально микроскоп на 40—50 мк и произвести счет числа частиц на уровне h_2.
9. Число отсчетов в п.п. 6-8 должно быть одинаковое.
10. Число частиц, находящихся в поле зрения в данный момент (с интервалом в 5 сек), записать в таблицу.
11. После окончания счета кювету снять со столика микроскопа.
12. Отметить абсолютную температуру Т эмульсии (комнатную).
13. Установить окуляр с пятнадцатикратным увеличением (х15) с сеткой.
14. Определить размеры сетки с помощью объект микрометра.
15. Каплю эмульсии нанести на предметное стекло и дать подсохнуть на воздухе, после чего накрыть покровным стеклом.
16. При высыхании среды зерна эмульсии соединяются цепочками, ими покрывается плотно участок поля. Поэтому можно подсчитать число зерен, имеющихся на стороне квадрата сетки.
17. Подсчет произвести десять раз в разных местах объекта. Эти подсчеты следует делать особенно тщательно, так как наибольшая ошибка происходит за счет ошибки при определении радиуса частицы.
18. Найти среднее значение радиуса частицы.

19. Вычислить число Авогадро по формуле (4).

Результаты измерений и расчетов должны быть занесены в таблицы.

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ И ПЛОТНОСТИ ГАЗА МЕТОДОМ ОТКАЧКИ [30]

Цель работы: освоить один из методов определения молекулярной массы и плотности газа.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка ФПТ 1-12.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения коэффициента теплопроводности воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТ 1-12, общий вид которой показан на рис. 1.

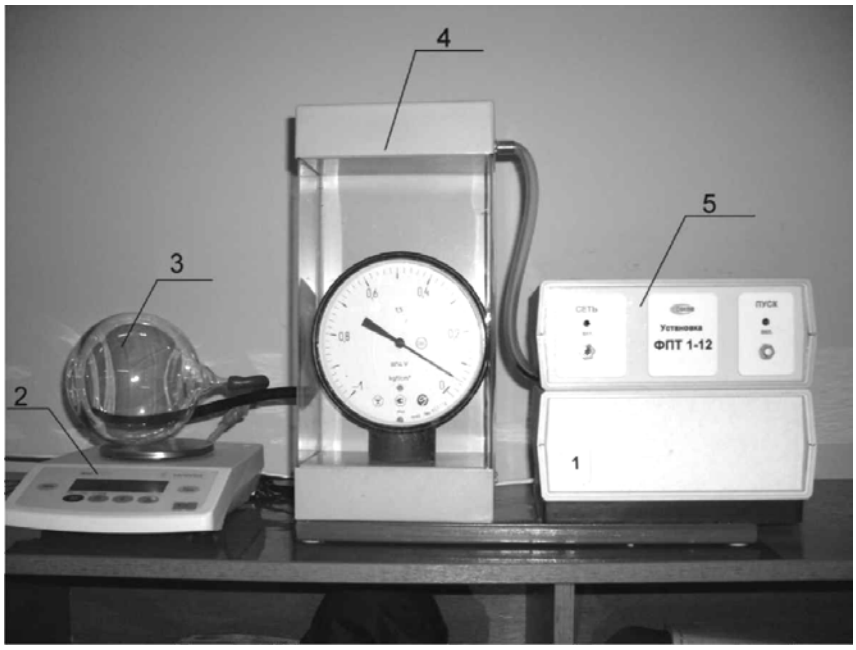


Рис. 1.

Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-12

1 - стойка; 2 - весы; 3 - колба 4 - вакуумметр; 5 - компрессор

Рабочим элементом установки является стеклянная колба 3, соединенная со стрелочным вакуумметром 4, показания которого P есть разность между атмосферным давлением в лаборатории P_0 и давлением газа в колбе P_K. Колба имеет отросток с краном, который с помощью резиновой трубки соединяется с входным патрубком компрессора 5.

Колба установлена на тарелке электронных весов. Значение объема V колбы указано на рабочем месте.

Если измерение давления P, объема V, температуры газа T, то есть параметров газа, входящих в уравнение Менделеева-Клапейрона, не вызывает особенных трудностей, то определение массы газа выполнить практически невозможно, так как взвешивание газа возможно только вместе с колбой, в которой он находится. Поэтому для определения μ необходимо исключить массу сосуда. Это можно сделать, рассмотрев уравнение состояния двух масс m_1 и m_2 одного и того же газа при неизменных температуре T и объеме V.

Пусть в колбе объемом V находится газ массой m_1 при давлении P_1 и температуре T. Уравнение состояния для этого газа имеет вид:

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT. \qquad (1)$$

Откачаем часть газа из колбы, не изменяя его температуры. После откачки масса газа, что оставалась в колбе, и его давление уменьшились. Обозначим их соответственно m_2 и P_2 и снова запишем уравнение состояния:

$$P_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT. \qquad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получим:

$$\mu = \frac{m_1 - m_2}{P_1 - P_2} \frac{RT}{V}. \qquad (3)$$

Полученная формула (3) дает возможность определить *ju,* если известно изменение массы газа (но не сама масса), а также изменение давления, температура и объем газа.

В данной работе исследуемым газом является воздух, который представляет собой смесь азота, кислорода, аргона и других газов.

Формула (3) пригодна и для определения μ смеси газов. Найденное в этом случае значение μ представляет собой некоторую среднюю или эффективную молярную массу смеси газов. Молярная масса смеси газов может быть рассчитана и теоретически, если известны процентное содержание и молярная масса каждого из газов, входящих в состав смеси, по формуле:

$$\mu_c = \frac{1}{\frac{m_1}{m}\frac{1}{\mu_1} + \frac{m_2}{m}\frac{1}{\mu_2} + \ldots + \frac{m_n}{m}\frac{1}{\mu_n}}, \qquad (4)$$

Если известна молярная масса газа, то можно легко определить еще одну важную характеристику газа - его плотность ρ. Определив μ, *из* уравнения Менделеева - Клапейрона получим:

$$\rho = \frac{P\mu}{RT}. \qquad (5)$$

Плотность смеси газов можно вычислить по формуле (5), подразумевая под μ эффективную молярную массу смеси.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Подать напряжение питания на электронные весы, включив установку тумблером «Сеть».

2. С помощью электронных весов определить массу колбы с воздухом ($m_0 + m_1$) при давлении P_1.

3. Включив компрессор тумблером «Пуск» и открыв кран, откачать воздух из колбы до давления P_2, после чего, закрыв кран и выключив компрессор, определить с помощью весов массу колбы с воздухом ($m_0 + m_2$) при давлении P_2. Полученные результаты занести в таблицу.

4. Повторить измерения по пунктам 2-3 не менее 3 раз.
5. Измерить температуру воздуха в лаборатории.
6. Выключить установку тумблером «Сеть».
7. Для каждого проведенного измерения определить массу откачанного воздуха ($m_1 - m_2$) и разность давлений ($P_1 - P_2$).

8. По формуле (4) вычислить для каждого измерения значение молекулярной массы воздуха μ. Найти среднее значение <μ>.

9. По формуле (5) вычислить для каждого измерения плотность воздуха, используя найденное значение молярной массы μ.

Оценить погрешность результатов измерений.

Таблица

Номер измерения	$m_0 + m_1$, кг	$m_0 + m_2$, кг	$m_1 - m_2$, кг	P_1, Па	P_2, Па	$P_2 - P_1$, Па	T, К	μ, кг/моль	ρ, кг/моль

Лабораторная работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРОВ ЭФИРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРОВ ЭФИРА.**

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: **ОСНОВНОЙ И КОНТРОЛЬНЫЙ ТЕРМОМЕТРЫ; АМПУЛА С ЭФИРОМ, ЗАКРЕПЛЕННАЯ НА ШТАТИВЕ; ГАЗОВАЯ ГОРЕЛКА.**

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

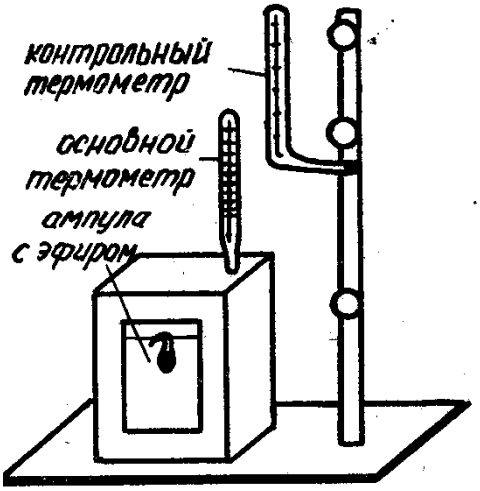


Рис. 2

В работе предполагается определить критическую температуру паров эфира. Для этой цели в небольшую стеклянную трубочку (рис. 2) налито небольшое количество эфира, и трубочка запаяна. Она подвешивается на проволоке внутри металлической коробки с двумя окошками для наблюдения. Сквозь пробку пропущен термометр для высоких температур. Коробка ставится на подставку, укрепляется на штативе. Под нее подводится газовая горелка, при температуре +130° следует приступить к внимательному наблюдению. Один из наблюдателей следит за явлением, происходящим в трубочке, другой за температурой. Незадолго до наступления критической температуры эфир начинает бурно кипеть, он мутнеет от обильного количества пузырьков. Мениск становится более плоским, тотчас после этого граница между жидкостью и парами становится неясной, количество жидкости быстро уменьшается, а над ней появляется струйка прозрачного пара. Затем плотность жидкости значительно уменьшается, плотность пара растет, и граница между жидкостью и паром исчезает (в момент выравнивания плотностей). Как только граница исчезнет, отодвигают газовую горелку и отмечают температуру появления жидкости. Когда станет, заметна вогнутость мениска, снова производят нагревание. Критическую температуру берут как среднее температур появления и исчезновения жидкостей. Наблюдения повторяют восемь раз, первые три раза из счета выбрасывают и из остальных пяти снова берут среднее. **Если бы случилось так, что трубочка взорвалась, то следует убрать газовую горелку.** Критическая температура химически чистого эфира ($C_4H_{10}O$)=193°С.

Обычно подаваемый эфир содержит примеси, и критическая температура его будет отличаться от приведенной. Кроме того, при высоких температурах в показание термометра следует ввести поправку на «выставляющий столбик ртути». Дело в том, что ртуть на некоторой высоте будет иметь не ту температуру, как в шарике, а гораздо ниже. Кажущийся эффект расширения ртути в стекле - 0,00016.

Если резервуар термометра и ртуть в нем имеют температуру t, а средняя температура „выставляющегося столбика" t°, то термометр показывает меньше, чем следует. Предположим, что „выставляющийся столбик" весь нагрелся до температуры $t°_1$, т. е. еще на ($t° - t°_1$), ртуть поднялась бы выше, и показание было бы верным. Будем считать длину столбика не в см, а в градусных делениях его. Каждое деление стало бы длиннее на величину 0,00016 ($t° - t°_1$). Итак, истинная температура будет:

$$\tau = t° [1 + 0{,}00016 (t° - t°_1)] \qquad (1)$$

Температуру определяют приблизительно так: берут контрольный термометр и держат его на высоте „выставляющегося столбика" ртути, рядом с ним. Наблюдаемая по нему температура и будет $t°_1$. Наблюдение это производят, конечно, при той температуре, что и наблюдалась во время работы. Это следует производить в конце наблюдений критической температуры. Найденную оправку прибавляют к среднему из всех наблюдений критических температур.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Поставить коробку на подставку, укрепить на штативе.
2. Подвести под коробку с ампулой газовую горелку.
3. При температуре +130° следует приступить к внимательному наблюдению. Один из наблюдателей следит за явлением, происходящим в трубочке, другой за температурой.
4. Как только граница между жидкостью и паром исчезнет, отодвинуть газовую горелку и отметить температуру.
5. Как только станет заметна вогнутость мениска, отметить температуру появления жидкости, снова произвести нагревание и повторить измерения п.п. 3-5.
6. Критическую температуру взять как среднее температур появления и исчезновения жидкости.
7. Наблюдения повторить восемь раз, первые три раза из счета выбросить и из остальных пяти снова взять среднее.
8. Взять контрольный термометр и держать его на высоте „выставляющегося столбика" ртути, рядом с ним. Измерить наблюдаемую по нему температуру $t°_1$.
9. Вычислить поправку на «выставляющийся столбик ртути».
10. Вычислить исправленное значение критической температуры. Для этого найденную поправку прибавить к среднему из всех наблюдений критических температур.
11. Результаты измерений и расчетов должны быть занесены в таблицу.

Это интересно

Эванджелиста Торричелли [14]

В 1630 году в Риме обучался математическим наукам скромный молодой человек по имени Эванджелиста Торричелли. Учителем его был Бенедетто Кастелли, профессор математики Римского университета и в прошлом один из любимейших учеников Галилея. Пораженный способностями молодого Торричелли, Кастелли отправился к Галилею, жившему тогда в Арчетри, и показал ему рукопись своего подопечного о движении свободно падающих тел. Он попросил великого ученого взять Торричелли к себе в дом в качестве ученика и помощника в подготовке исследований по механике. Галилей охотно согласился, но совместная работа продолжалась всего три месяца — до смерти Галилея. Великий герцог Тосканский, приехавший на похороны, назначил Торричелли на ставшую вакантной должность придворного математика.

Примерно в это время, незадолго до смерти Галилея, к нему обратился с просьбой о помощи фонтанных дел мастер другого вельможи — великого герцога Флорентийского. Дело в том, что ему никак не удавалось заставить заработать задуманный им грандиозный фонтан, вода в котором должна была подниматься на высоту более пятнадцати метров, а затем изливаться каскадом струй. Упрямая вода не хотела подчиняться замыслу мастера — как сильно ни качал ее насос, она никак не поднималась на высоту, большую десяти метров, хотя, согласно аристотелевой формуле «природа боится пустоты», она должна была это сделать. Галилей не смог объяснить происходящего, но остроумно заметил, что, по-видимому, страх природы перед пустотой не превосходит десяти метров. Торричелли, размышляя об этом явлении, заподозрил здесь влияние атмосферного воздуха. Физики считали тогда, что воздух не имеет веса. Торричелли предположил, что это не так и именно вес воздуха, давление его столба, простирающегося на всю высоту атмосферы, уравновешивает воду в трубе и не дает ей подняться больше, чем на 10 с небольшим метров.

Для проверки гипотезы Торричелли придумал классический по простоте и наглядности опыт, обессмертивший его имя. Он предположил, что если вода поднимается в трубе только на определенную высоту, то если в трубу поместить жидкость, более тяжелую, чем вода, она поднимется на высоту меньшую, чем поднималась вода. Это уменьшение должно соответствовать отношению удельных весов воды и выбранной жидкости. Для опыта ученый избрал самую тяжелую известную ему жидкость — ртуть, «живое серебро». Легко представить восторг Торричелли и ассистировавшего ему Вивиани, когда ртуть в трубке, немного поколебавшись, остановилась на уровне, точно предсказанном новой теорией!

Открытие вызвало всеобщий интерес. Сразу же разгорелась яростная дискуссия между сторонниками нового учения и приверженцами «боязни пустоты». Блез Паскаль, великий французский физик, решил проделать опыт, который бы убедил сомневающихся в правоте аристотелевской концепции. Паскаль рассуждал, что если теория Торричелли верна, то на высокой горе, где высота и вес слоя атмосферы меньше, чем на поверхности Земли, ртуть в трубке должна остановиться на более низком уровне, а если действительно «природа боится пустоты», то высота подъема должна быть одной и той же. Опыт, который был проведен 19 декабря 1648 года родственником Паскаля Перье на горе Пюи-де-Дом, полностью подтвердил правоту Торричелли. С тех пор Паскаль стал ярым сторонником теории атмосферного давления и внес в нее большой вклад.

Через несколько лет об опыте Торричелли узнал магдебургский бургомистр Отто фон Герике, способный и изобретательный экспериментатор, обожающий театральные эффекты. Он рассказывал, как у него в один прекрасный момент появилось огромное желание лично убедиться в возможности образования пустоты. После многочисленных экспериментов Герике изобрел воздушный насос, с помощью которого он проделывал опыты, изумлявшие его современников. Самым любопытным из них был хрестоматийный опыт с магдебургскими полушариями. Из медного шара, состоящего из двух полушарий, Отто фон Герике при помощи своего воздушного насоса выкачивал воздух; атмосферное давление с такой силой сжимало половинки шара, что их не могли разъединить 24 лошади. Стремясь к новым эффектам, Герике разнообразил форму своих экспериментов. В 1654 году он продемонстрировал в Регенсбурге императорскому посланнику такой весьма впечатляющий опыт. Прикрепив к насосу большой шар, из которого был выкачан воздух, Герике запер кран, через который воздух мог попадать внутрь шара. Поршень в насосе был поднят, а к концу поршня была привязана веревка, перекинутая через блок. За конец веревки ухватились двадцать дюжих мужчин и натянули ее. Неожиданно Герике открыл кран, в шар ворвался воздух, поршень под давлением воздуха мгновенно опустился, приподняв на полметра от земли тех, кто пытался удержать веревку. Так было эффектно доказано существование атмосферного давления.

ТЕМА №2

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

ЛИТЕРАТУРА

[Р1]. Гл. III.

[Р2]. §§ 49 – 54.

[Р3]. Гл. VII.

[Р4]. Гл. 12.

[Р5]. Стр. 169—172.

[Р6]. Гл. II.3.

[Р7]. Гл. II.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Молекулярные движения и явления переноса.
2. Среднее число столкновений в единицу времени и средняя длина свободного пробега молекул.
3. Зависимость средней длины свободного пробега молекул от параметров газа.
4. Эффективное поперечное сечение частицы и вероятность.
5. Экспериментальное определение длины свободного пробега.
6. Диффузия в газах. Основной закон диффузии (закон Фика).
7. Нестационарная диффузия

8. Стационарная диффузия. Вычисление коэффициента диффузии.
9. Коэффициент взаимной диффузии. Измерение коэффициента диффузии.
10. Теплопроводность газов. Закон Фурье.
11. Нестационарная теплопроводность.
12. Стационарная теплопроводность. Вычисление коэффициента теплопроводности.
13. Зависимость коэффициента теплопроводности от параметров газа. Измерение коэффициента теплопроводности.
14. Вязкость газов (внутреннее трение). Вывод формулы Ньютона для вязкого трения на основании кинетической теории газов.
15. Измерение коэффициента вязкости (вискозиметрия). Методы измерения коэффициента вязкости: а) метод капилляра; б) метод затухания колебаний.

Качественные вопросы

1. Вы собираетесь завтракать, налили в стакан кофе. Но вас просят отлучиться на несколько минут. Что надо сделать, чтобы к вашему возвращению кофе было горячим: налить в него молока сразу перед уходом или после, когда вы вернётесь? Почему?
2. Температура пламени свечи 1600 °С. Температура плавления железа 1400 °С. Почему же гвоздь не плавится на свечке?
3. Почему соль и сахар растворяются быстрее в горячей воде, чем в холодной?
4. **Почему запах разогретого асфальта ощущается издалека?**
5. Если узкую полоску бумаги плотно намотать винтом на металлический стержень, а затем внести в пламя свечи, то бумага не горит. Почему?
6. В чём состоит процесс окрашивания?
7. При какой температуре и металл, и дерево будут казаться на ощупь одинаково нагретыми?
8. В одежде из синтетической ткани в холод холоднее, а в жару теплее, чем в шерстяной. Почему?
9. Почему в устьях рек образуются мели и островки?
10. Почему с разной скоростью плывут по реке не имеющие собственных двигателей плоты? Причем, чем сильнее загружен плот, тем более быстроходным он становится. С чем это связано?
11. Готовясь к осеннему перелету, птицы накапливают жировой запас. Зачем?
12. В холодную погоду многие животные спят, свернувшись в клубок. Почему?
13. Теплопроводность каких дров меньше, сырых или сухих? Почему?
14. Почему, спускаясь на лодке по реке, плывут посередине реки, а поднимаясь, стараются держаться берега?
15. Как происходит теплопередача при измерении температуры тела: если оно теплее термометра, если оно холоднее термометра?
16. На каком физическом явлении основывается засолка помидоров, огурцов, капусты и других овощей?
17. Почему соленая сельдь, после того как ее положили на некоторое время в воду, делается менее соленой?
18. Почему аромат цветов мы чувствуем на расстоянии?

19. Многие морские животные, например кальмары и др., при нападении на них выбрасывают темно-синюю защитную жидкость или ставят «световую завесу». Почему через некоторое время вода, где находится эта жидкость, становится прозрачной?
20. Объясните с физической точки зрения, что такое ветер, почему он возникает и какими физическими процессами сопровождается.
21. Нормальная температура тела человека равна 36,6 °С. Однако ему не холодно, когда температура воздуха 25 °С, и очень жарко, когда она равна 36 °С. В воде же, наоборот, при 36 °С человек чувствует себя нормально, а при 25 °С ему холодно. Как объяснить этот парадокс?

Как вы думаете

1. Существуют ли в природе явления, которые можно описать одним-единственным законом физики?
2. Что является общим для всех явлений переноса?
3. В каких формах проявляется существование явлений переноса?
4. Зависит ли реальный физический факт (например, явление диффузии) от того, в какой системе отсчета он рассматривается?
5. Меняется ли длина свободного пробега молекул при переходе из одной системы отсчета в другую?
6. Является ли коэффициент вязкости абсолютной характеристикой газа? Можно ли абсолютно точно определить коэффициент вязкости?
7. Какими особенностями обладает теплопроводность в сравнении с другими явлениями переноса?
8. От чего зависят практические возможности человека в использовании явления диффузии?
9. В рамках какой структуры условий действует закон Фика?
10. Каковы черты сходства и различия явлений диффузии и теплопроводности?
11. Какой физической реальности соответствует понятие об эффективном поперечном сечении молекул?
12. Каковы сущность и формы проявления явлений переноса?
13. Существуют ли в природе стационарные диффузия и теплопроводность?
14. Связаны ли законы, описывающие явления переноса, со свойствами пространства-времени?
15. От каких свойств вещества можно абстрагироваться при исследовании явлений переноса?

Проверь себя!

1. Два сосуда одинаковых объемов доверху наполнены теплой водой. Чтобы остудить воду, один сосуд ставят на лед, а на другой сосуд сверху кладут большой кусок льда. При этом
    a) охлаждение будет эффективнее, если лед положить сверху;
    b) охлаждение будет эффективнее, если лед положить снизу;
    c) охлаждение будет одинаковым, независимо от места нахождения льда.

2. На столе давно лежат две ложки. Одна деревянная, другая металлическая. Обе они должны иметь одинаковую температуру — температуру окружающего воздуха. Однако если возьмем их в руки, то почувствуем, что металлическая ложка явно холоднее. Дело здесь в том, что
   a) дерево обладает по сравнению с металлом меньшей теплопроводностью, поэтому нагревается меньше;
   b) дерево обладает по сравнению с металлом большей теплоемкостью, поэтому нагревается меньше;
   c) металл обладает хорошей теплопроводностью; это приводит к большому теплоотводу от пальцев и их охлаждению.
3. Теплозащитные свойства текстильных материалов определяются главным образом
   a) теплопроводностью воздуха, находящегося в открытых порах материала;
   b) коэффициентом теплопроводности волокон;
   c) теплопроводностью воздуха, находящегося в закрытых порах материала.
4. Повышение влажности текстильных материалов
   a) приводит к повышению их теплозащитных свойств;
   b) приводит к понижению их теплозащитных свойств;
   c) не влияет на их теплозащитные свойства.
5. При температуре воздуха и воды около 30 ^{o}C скорость теплоотдачи организма человека
   a) одинакова в обеих средах, так как организм находится в термодинамическом равновесии со средой;
   b) в воде больше, чем в воздухе, а так как теплопроводность воды значительно больше, чем теплопроводность воздуха, то у человека возникает ощущение теплоты в воздухе и прохлады в воде;
   c) в воздухе больше, чем в воде, так как организм в процессе эволюции приспособился чувствовать себя хорошо при средней температуре воздуха 25°C, а при температуре воздуха около 30 ^{o}C у человека возникает необходимость в отводе избыточного количества теплоты..
6. Чтобы сильнее остудить горячий чай, надо
   a) сразу бросить в него сахар и затем подождать;
   b) выждать несколько минут и положить сахар;
   c) бросить в него сахар до закипания.
7. На столе две одинаковые чашки, в них разные ложечки — стальная и алюминиевая. В чашки наливают горячий чай. Если ложечки из чашек не вынимать, чай остынет
   a) быстрее в чашке с алюминиевой ложкой;
   b) быстрее в чашке со стальной ложкой;
   c) одновременно в обеих чашках.

Лабораторная работа №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ И КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определить коэффициент внутреннего трения воздуха, длину свободного пробега молекул.

Приборы и принадлежности: сосуд с краником; капиллярная трубка; мензурка.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Если газ протекает по узкой трубе, то слой, который непосредственно касается стенок, будет оставаться неподвижным и вдоль радиуса трубки устанавливается градиент скорости и, следовательно, появится сила вязкости (сила внутреннего трения, противодействующая движению внутренних слоев относительно внешних), равная

$$F = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} S,$$

где S – поверхность слоя, η – коэффициент внутреннего трения.

Если длина трубки *l*, радиус ее r, давление, под действием которого происходит течение газов, есть p, коэффициент внутреннего трения газа η, то объем газа, протекающего через трубку за время Δt, будет:

$$V = \frac{\pi p r^4 \Delta t}{8 \eta l}$$

Отсюда:

$$\eta = \frac{\pi p r^4 \Delta t}{8 V l} \qquad (1)$$

Зная коэффициент внутреннего трения η, можно определить длину свободного пробега молекул, используя известную формулу

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \lambda$$

Отсюда:

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho \bar{v}} \qquad \textbf{(2)}$$

Среднеквадратичная скорость молекул $\bar{v}$ равна

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad (3)$$

Плотность газа ρ определяем из уравнения Менделеева-Клапейрона как

$$\rho = \frac{pM}{RT} \qquad \textbf{(4)}$$

В настоящей работе требуется определить коэффициент внутреннего трения воздуха, длину свободного пробега молекул. Для этого пользуются прибором, изображенным на рис. 3.

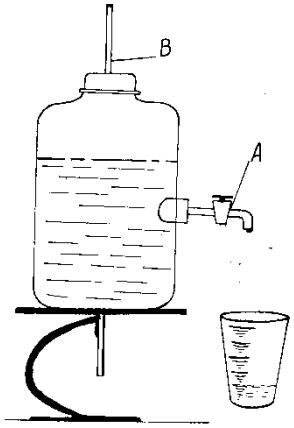


Рис. 3.

Большой стеклянный баллон, имеющий внизу кран А, наполняется водой и плотно закрывается пробкой, в которую вставлен капилляр.

Отметим начальную высоту воды в баллоне h_1, подставим под кран мензурку, открываем его, отмечая по часам момент открытия, даем возможность воде вытекать в течение 3 минут, после чего закрываем кран, отмечая новую высоту в баллоне h_2 , и по мензурке отмечаем количество вытекшей воды. Количество воды будет равно объему вошедшего газа через капилляр, т.е. нам удается измерить объем вошедшего в баллон воздуха. Продолжительность течения газа также измеряется по часам. Давление вычисляется так:

$$p = \rho_ж hg, \qquad (5)$$

где $h = (h_1 + h_2)/2$,

$\rho_ж$ - плотность жидкости.

Радиус капилляра равен $r = 2{,}4 \cdot 10^{-2}$ см, а длина его l = 16 см, следовательно, все данные для вычисления по формуле (1) мы имеем.

Измерив по термометру комнатную температуру и переведя ее в абсолютную, определяем сначала среднюю квадратичную скорость, а затем длину свободного пробега молекул, определяем число столкновений молекул в секунду по формуле:

$$z = \frac{\bar{v}}{\lambda} \qquad (6)$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Отметить начальную высоту воды в баллоне h_1.
2. Подставив под кран мензурку, открыть его, отмечая по часам момент открытия.
3. Дать возможность воде вытекать в течение 3 минут, после чего закрыть кран, отмечая новую высоту в баллоне h_2.
4. Измерить в мензурке количество вытекшей воды.
5. Вычислить давление газа по формуле (5).
6. Вычислить коэффициент внутреннего трения по формуле (1).
7. Измерить по термометру комнатную температуру.
8. Вычислить среднюю квадратичную скорость молекул газа.
9. Вычислить плотность газа.
10. Вычислить длину свободного пробега молекул газа по формуле (2).
11. Вычислить число столкновений молекул в секунду по формуле (6).

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ [30]

Цель работы: изучить теплопроводность воздуха.

Приборы и принадлежности: установка ФПТ 1-3.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения коэффициента теплопроводности воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТ1-3, общий вид которой показан на рис. 4. Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную трубку, заполненную воздухом, вдоль оси которой натянута вольфрамовая проволока 4. Температура трубки в ходе эксперимента поддерживается постоянной благодаря принудительной циркуляции воздуха между трубкой и кожухом блока рабочего элемента 3, которая осуществляется с помощью вентилятора, находящегося в блоке рабочего элемента. Температура воздуха в трубке измеряется цифровым термометром 2. Значения падения напряжения на эталонном резисторе U_P и на проволоке U_H измеряются цифровым вольтметром. Значение напряжения на проволоке устанавливается регулятором «Нагрев», который находится на передней панели блока приборов 1. Геометрические размеры рабочего элемента - диаметр трубки D, диаметр проволоки d, длина трубки L, температурный коэффициент сопротивления материала проволоки α - указаны на рабочем месте.

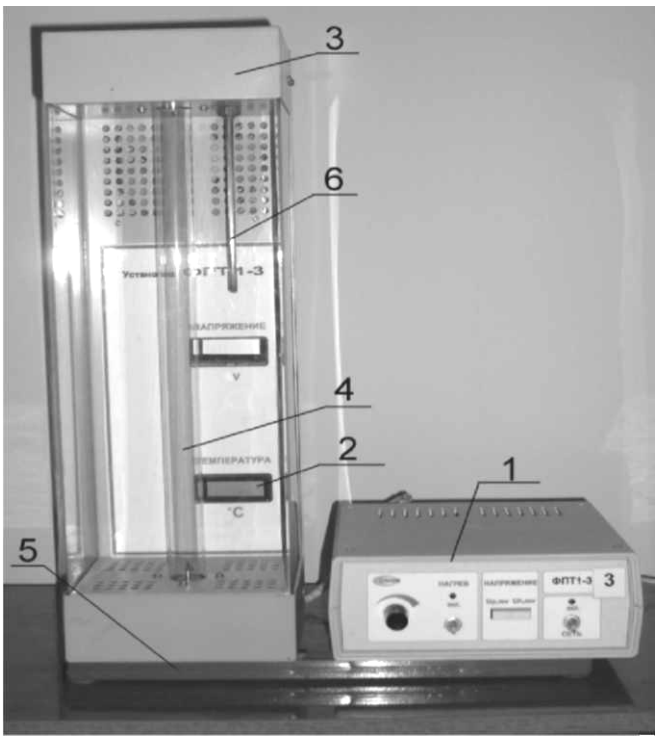


Рис. 4.

Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-3

1 - блок приборов; 2 - цифровой термометр: 3 - блок рабочего элемента; 4 - вольфрамовая проволока; 5 - стойка; 6 - датчик температуры (термопара)

Распространение теплоты в газах осуществляется тремя способами: тепловым излучением (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекцией (перенос энергии за счет перемещения слоев газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой) и теплопроводностью. Теплопроводность - это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет хаотичного теплового движения молекул. При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией. Для стационарного процесса, при котором разность температур в слое газа не изменяется со временем, количество теплоты δQ, которая переносится вследствие теплопроводности за время dτ через поверхность площадью S, перпендикулярную к направлению переноса энергии, в направлении уменьшения температуры, определяется по закону Фурье:

$$\delta Q = -\psi \frac{dT}{dr} S d\tau \qquad (1)$$

где ψ - коэффициент теплопроводности; dT/dr - градиент температуры.

Для идеального газа:

$$\psi = \frac{1}{3} \rho < \lambda > < v_T > C_V \qquad (2)$$

Рассмотрим два коаксиальных цилиндра, пространство между которыми заполнено газом. Если внутренний цилиндр нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной, ниже температуры нагревателя, то в кольцевом слое газа возникает радиальный поток теплоты, направленный от внутреннего цилиндра к наружному. При этом температура слоев газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок. Выделим в газе кольцевой слой радиусом r, толщиной dr и длиной L. По закону Фурье (1) тепловой поток $q = \delta Q / d\tau$, т.е. количество теплоты, которая проходит через этот слой за одну секунду, можно записать в виде

$$q = -\psi \frac{dT}{dr} S = -\psi \frac{dT}{dr} 2\pi r L \tag{3}$$

Разделяя переменные, получим

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\psi L}{q} dT$$

Тогда

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\psi L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT$$

или

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\psi L}{q} (T_1 - T_2) \tag{4}$$

Здесь T_1R_1 и T_2R_2 - соответственно температуры поверхностей и радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

Из уравнения (4) получим формулу для определения коэффициента теплопроводности газа:

$$\psi = \frac{q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L (T_1 - T_2)} \tag{5}$$

Формулу (5) получили в предположении, что теплота переносится от внутреннего к наружному цилиндру только благодаря теплопроводности. Это предположение достаточно обосновано, поскольку поток лучистой энергии при невысоких температурах и малом диаметре нагревателя составляет незначительную часть количества теплоты, которая переносится, а конвекция устраняется подбором диаметра наружного цилиндра и его вертикальным расположением в экспериментальной установке.

Внутренним цилиндром может служить тонкая проволока (нить), обычно вольфрамовая, которая нагревается электрическим током. Тогда после установления стационарного режима тепловой поток можно принять равным мощности электрического тока, протекающего через проволоку.

$$q = I_H U_H$$

где I_H - ток через проволоку; U_H - падение напряжения на проволоке.

Если последовательно с проволокой включить эталонный резистор сопротивления R_P, то:

$$I_H = \frac{U_p}{R_p}$$

и тогда.

$$q = \frac{U_p U_H}{R_p} \qquad (6)$$

где U_P - падение напряжения на эталонном резисторе.

Используя равенство (6) в формуле (5), получим:

$$\psi = \frac{U_p U_H \ln \frac{D}{d}}{2\pi L R_p \Delta T} \qquad (7)$$

здесь D и d - диаметры наружного цилиндра и проволоки; $\Delta T = T_H - T_T$ -разность температур проволоки и наружного цилиндра (трубки). Температуру трубки T_T можно принять равной температуре окружающего воздуха.

Для вычисления разности температур АТ в слое газа напишем формулы, по которым определим сопротивление проволоки при температуре окружающего воздуха и в нагретом состоянии:

$$R_{HT} = R_0(1 + \alpha t_T)$$

$$R_H = R_0(1 + \alpha t)$$

Исключив из этих равенств R_0, найдем:

$$\Delta T = t - t_T = \frac{R_H - R_{HT}}{\alpha R_{HT}}(1 + \alpha t_0)$$

Учитывая, что

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}, \quad I_H = \frac{U_p}{R_p}, \quad R_{HT} = \frac{U_{HT}}{I_{HT}}, \quad I_{HT} = \frac{U_{pT}}{R_{pT}},$$

получим:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_p} - \frac{U_{HT}}{U_{pT}}\right)(1 + \alpha t_0)}{\frac{U_{HT}}{U_{pT}}\alpha}, \tag{8}$$

где U_H, U_{HT} - падение напряжения на проволоке соответственно в нагретом состоянии и при температуре окружающего воздуха t_o, U_p, $U_{pT.}$ – падение напряжения на эталонном резисторе соответственно при нагретой проволоке и при температуре окружающего воздуха t_0.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Включить установку тумблером «Сеть».
2. Включить тумблер «Нагрев».
3. Нажать кнопку «U_P» (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе) и с помощью регулятора «Нагрев» установить падение напряжения не более 0,06 В, при котором температура проволоки остается практически неизменной («не нагревающий» ток).
4. Нажать кнопку «U_H» (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрировать значение напряжения.
5. Повторить измерения по пунктам 2-3 для 3-5 значений напряжения U_{pT}. Все результаты занести в таблицу.
6. Нажать кнопку «U_P» и с помощью регулятора «Нагрев» установить падение напряжения на эталонном резисторе U_P в диапазоне 0,3-1,5 В.
7. Подождав 2 минуты, что необходимо для стабилизации теплового режима рабочего элемента, нажать кнопку «U_H» и определить падение напряжения на проволоке U_H..
8. Повторить измерения по пунктам 5-6 для 3-5 значений падения напряжения U_P. Результаты занести в таблицу.
9. Установить ручку регулятора «Нагрев» на минимум. Отключить тумблер «Нагрев», после чего отключить установку тумблером «Сеть».
10. Для каждого измерения по формуле (8) рассчитать разность температур ΔT, а по формуле (7) - коэффициент теплопроводности Ψ. Занести полученные значения в таблицу.
11. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха. Оценить погрешность результатов измерения.

Лабораторная работа №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: изучить одно из явлений переноса в газах - внутреннее трение воздуха.

Приборы и принадлежности: установка ФПТ 1-1.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения коэффициента вязкости воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТ 1-1, общий вид которой показан на рис. 5.

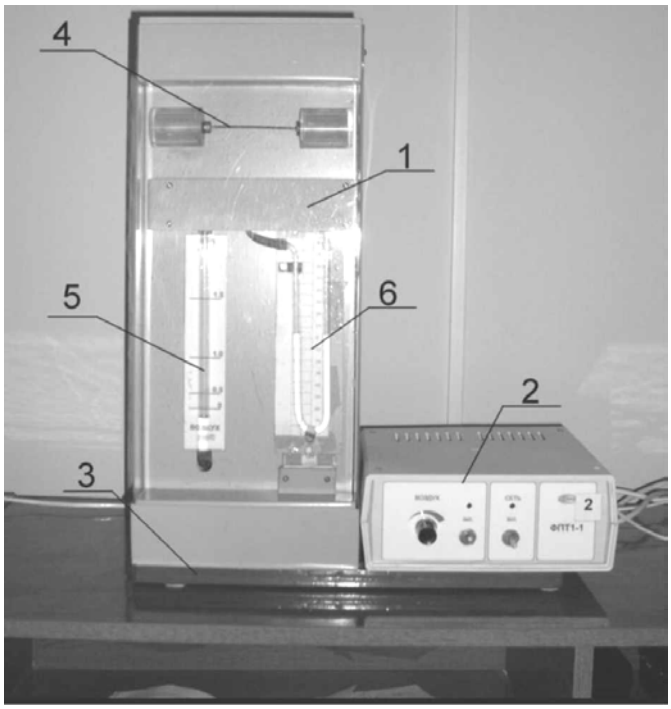


Рис. 5.

Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-1

1 - блок рабочего элемента; 2 - блок приборов; 3 - стойка; 4 - капилляр; 5 - реометр; 6 - манометр

Воздух в капилляр 4 нагнетается микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 2. Объемный расход воздуха измеряется реометром 5, а нужное его значение устанавливается регулятором «Воздух», который находится на передней панели блока приборов. Для измерения разности давлений воздуха на концах капилляра предназначен V-образный водяной манометр 6. Геометрические размеры капилляра – радиус r и длина L – указаны на рабочем месте.

Для экспериментального определения коэффициента вязкости газа η можно использовать формулу Пуазейля:

$$Q = \pi \frac{\Delta p}{8\eta L} r^4 \qquad (1)$$

Здесь Q – объемный расход газа, то есть объем, что протекает за единицу времени через поперечное сечение трубы радиуса r и длины L, Δp – разность давлений на концах трубы.

Формула Пуазейля была получена в предположении ламинарного течения газа или жидкости. Однако с увеличением скорости потока движение становится турбулентным, и слои смешиваются. При турбулентном движении скорость в каждой точке меняет свое значение и направление, сохраняется только среднее значение скорости. Характер движения жидкости или газа в трубе определяется числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\langle v \rangle r \rho}{\eta}$$

где $\langle v \rangle$ – средняя скорость потока; ρ – плотность жидкости или газа.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при R_e « 1000. Поэтому в случае использования формулы Пуазейля необходимо обеспечить выполнение условия R_e < 1000.

Кроме того, эксперимент необходимо проводить таким образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда перепад давлений вдоль капилляра значительно меньший самого давления. В данной

установке давление газа несколько больше атмосферного (10^3 см вод.ст.), а перепад давлений составляет от ~10 см вод.ст., то есть приблизительно 1% от атмосферного.

Формула (1) справедлива для участка трубы, в котором установилось постоянное течение с квадратичным законом распределения скоростей по сечению трубы. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия r << L, где r – радиус; L – длина капилляра.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Включить установку тумблером «Сеть».

2. С помощью регулятора «Воздух» установить по показаниям реометра выбранное значение объемного расхода воздуха Q.

3. Измерить разность давлений Δp в коленах манометра. Значения Q и Δp занести в таблицу.

4. Повторить измерения по пунктам 2-3 для 5 значений объемного расхода воздуха.

5. Установить регулятор расхода воздуха на минимум, после чего выключить установку тумблером «Сеть».

6. Для каждого режима определить по формуле Пуазейля коэффициент вязкости воздуха. Найти среднее значение коэффициента вязкости.

7. По формуле:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха μ = 29 кг/кмоль.

8. По формуле

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v_T \rangle}$$

вычислить среднюю длину свободного пробега молекул. При этом плотность воздуха найти, исходя из известных значений температуры и давления в лаборатории в процессе проведения эксперимента.

9. Оценить погрешность результатов измерения.

Лабораторная работа №7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОДЫ

Цель работы: определение коэффициента внутреннего трения воды и его зависимости от температуры охлаждения.

Приборы и принадлежности: вискозиметр; стеклянный сосуд; электрический подогреватель, опущенный в сосуд; резиновая груша; секундомер; термометр; мешалка.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Прибор, служащий для определения вязкости, носит название вискозиметра.

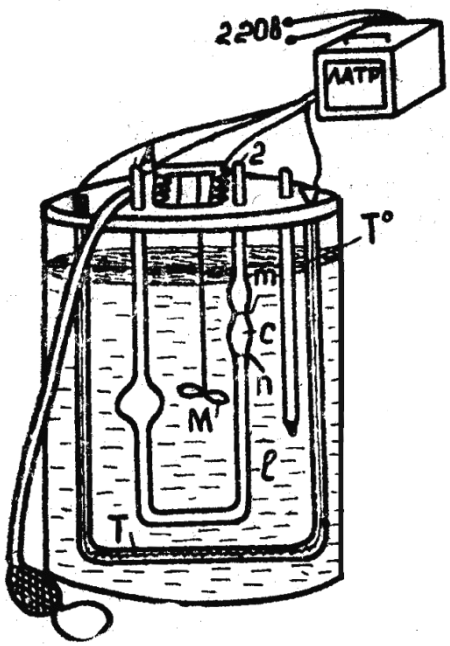


Рис. 6.

Вискозиметр служит для определения вязкости жидкости в зависимости от температуры. Он представляет собой U-образную трубку, широкое колено которой заканчивается книзу расширением, а другое колено состоит из капилляра *l*, заканчивающегося наверху шариком С, который переходит в другой шарик и затем более широкую трубку (рис. 6). Над шариком и под ним нанесены две метки «m» и «n», ограничивающие собой вполне определенный объем жидкости, время истечения которого t измеряется на опыте. Прибор закрепляется в зажиме к крышке и опускается в сосуд с водой так, чтобы уровень воды был выше метки «m». В сосуд опускается грелка Т, термометр и мешалка М.

Измеряя время t_i протекания по трубе объема жидкости, помещающейся в шарике С при температуре T_i, которую будет иметь вода в сосуде, можно для каждой измеренной температуры T_i вычислить коэффициент внутреннего трения η_i по формуле

$$\eta_i = \eta_0 \frac{t_i \rho_i}{t_0 \rho_0}, \qquad (1)$$

взяв из таблиц значения плотности ρ_0 и ρ_i при комнатной температуре T_0 и температуре T_i, а также значение коэффициента внутреннего трения η_0 при комнатной температуре T_0.

Измерения и их обработка

1. Перед производством опыта впустить при помощи пипетки в широкое колено некоторое количество испытуемой жидкости (подкрашенная вода).

2. После этого при помощи груши осторожно нагнетать воздух в колено трубки так, чтобы уровень жидкости оказался выше верхней метки (при этом отверстие А прикрыть пальцем).
3. После этого, закрыв отверстие другим пальцем, отнять грушу, и, сняв палец с отверстия А предоставить возможность жидкости протекать через трубку.
4. Пустить секундомер в тот момент, когда мениск проходит через метку «m». Таким образом, определяется время t_0 протекания по трубе объема жидкости, помещающейся в шарике С при комнатной температуре T_0, которую будет иметь вода в сосуде.
5. Включить цепь в осветительную сеть и, перемешивая, нагреть воду в сосуде на 6 °С, затем ток выключить.
6. Наблюдая за тем, чтобы температура воды оставалась постоянной, вновь произвести измерения п.п.1-5.
7. Опыт повторить 10—15 раз, каждый раз повышая температуру на 6 °С, причем для каждой данной температуры повторить 2 - 3 раза.
8. Для каждой измеренной температуры вычислить коэффициент внутреннего трения по формуле (1).
9. Зависимость коэффициента внутреннего трения от температуры изобразить графически.
10. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.
11. Подсчитать относительную, абсолютную и вероятную ошибки.

Лабораторная работа №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕСКА

Цель работы: ознакомление с одним из методов экспериментального определения теплопроводности твердых тел.

Приборы и принадлежности: прибор для определения коэффициента теплопроводности песка; термометр; секундомер; разновески; мензурка; песок.

Описание экспериментальной установки

Прибор для определения теплопроводности состоит из цилиндра, сделанного из картона и помещенного в металлический кожух (рис. 7). Между картонным цилиндром и кожухом помещен слой тепловой изоляции (слой ваты). В нижней части прибора помещается паровая коробка С, на верхней крышке которой помещается испытуемое вещество (слой песка). На этот слой ставится калориметр, плотно прилегающий к картонному цилиндру. Через паровую коробку пропускают пар из кипятильника. Калориметр заполняется водой.

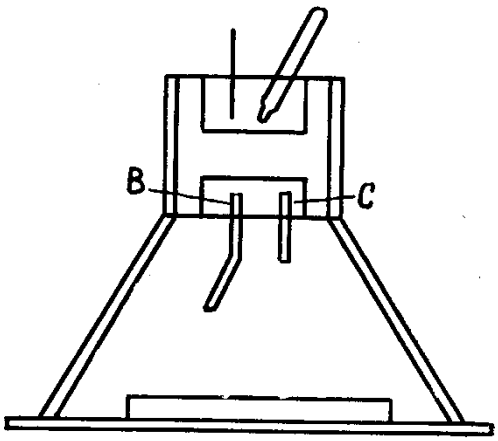


Рис. 7.

Количество теплоты, полученное калориметром за время опыта, равно:

$$Q = (Mc_1 + mc)(t_2 - t_1) \qquad (1)$$

где c_1 — удельная теплоемкость воды, M — масса воды в калориметре, c – удельная теплоемкость песка, m — масса песка, t_1 — начальная температура, t_2 — конечная температура воды в калориметре.

С другой стороны, количество тепла, полученное калориметром, равно:

$$Q = \kappa \frac{T_1 - T_2}{l} S\tau \qquad (2)$$

где T_1 – температура пара воды (определяется по таблице зависимости температуры кипения воды от давления), T_2 – средняя температура воды в калориметре, l – толщина слоя песка.

ПРИМЕМ

$$T_2 = (t_1 + t_2)/2 \qquad (3)$$

Объединяя (1), (2), (3), получим:

$$\kappa = \frac{(Mc_1 + mc)(t_2 - t_1)l}{(T - \frac{t_1 + t_2}{2})S\tau} \qquad (4)$$

Измерения и их обработка

1. Определить прямым измерением площадь дна калориметра.
2. Отмерить мензуркой некоторое количество песка с таким расчетом, чтобы высота слоя песка, высыпанного на поверхность паровой коробки, была около 2 см.
3. Взвесить калориметр.

4. Налить в калориметр определенное (измеренное) количество воды и поставить его на слой песка.
5. Пропустить пар из парообразователя в паровую коробку.
6. Наблюдать за изменением температуры в калориметре, помешивая в нем воду.
7. Измерить температуру t_1 в момент, когда температура повышается на 1-2 ^{0}C.
8. Пустить секундомер.
9. После того, как температура в калориметре поднимется на 4-6 ^{0}C, остановить секундомер и отметить конечную температуру опыта t_2.
10. Отсчитать по секундомеру продолжительность опыта τ.
11. Вычислить по формуле (4) коэффициент теплопроводности κ .

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Это интересно [13]

В 1857 и 1859 годах были опубликованы две статьи Клаузиуса по кинетической теории газов, в которых рассматривалась роль, которую могла бы играть вращательная энергия молекул в теплосодержании вещества, и была сделана попытка определить физический смысл понятия свободного пробега молекулы. Эти статьи давали новое развитие взглядам Даниила Бернулли, члена Петербургской академии наук. Бернулли первым указал на то, что теплота есть внешнее проявление колебательного движения отдельных молекул. Молекулы, следовательно, обладали скоростью. Все — одинаковой. Клаузиус первый высказал мысль о том, что эти скорости могут быть разными. Но разные скорости — это гигантская трудность в формулировании газовых законов. Ведь немыслимо записывать эти законы для каждой отдельной молекулы! И Клаузиус приходит к понятию «средней» скорости молекул, точнее — средней кинетической энергии молекул. Однако Клаузиус, сказав «а», не говорил «б».

Можно ли переделать формулы кинетической теории таким образом, чтобы учесть различие между скоростями молекул, учесть каждую отдельную молекулу? Конечно, нельзя! Но всегда можно математически точно выразить, насколько вероятно существование в газе при определенной температуре молекул с именно такой скоростью и какую часть от общего числа будут составлять молекулы с такой скоростью или близкой к ней. Существовавшая уже к тому времени теория вероятностей позволяла, например, вычислить вероятность попадания пули в мишень или вероятность проживания, например, в Лондоне мужчин именно такого роста. Эта возможность — и попадания пули в мишень, и наличия в Лондоне людей такого-то роста, и наличие в газе молекул с такой-то скоростью — описывалась однотипной кривой, имеющей форму колокола. Вершина ее соответствовала и «яблочку» мишени, и самому что ни на есть часто встречающемуся мужскому росту в Лондоне того времени: 168 сантиметров, и наиболее вероятной в данном газе скорости молекулы.

Это было нововведением колоссальной, непреходящей философской важности для физики. Впервые в физике были сказаны слова ***«вероятно»,*** «это событие может произойти с большой степенью ***вероятности».*** Раньше события были строго детерминированы. Все физические законы несли на себе печать полной определенности.

Если известен путь и время равномерного прямолинейного движения, можно однозначно определить скорость, причем не с какой-либо степенью вероятности, а совершенно точно.

Максвеллу удалось подчинить строгим законам хаотическое движение молекул газа. Именно *полная* беспорядочность движения молекул позволила ему извлечь из хаоса порядок. Статистический, вероятный подход позволял *точно* указать, например, число частиц, обладающих удвоенной или утроенной средней кинетической энергией. И эти цифры, как оказалось, подчинились универсальному закону, который не зависит от природы частиц и сил, с которыми они действуют друг на друга.

В физику впервые вошли вероятностные представления, законы статистики. В физике произошла революция, однако новая теория казалась кое-кому и вредной, поскольку молекулярный хаос, введенный Максвеллом, был внешне куда менее привлекателен и математически куда более сложен. А один из выводов новой теории, не совпадавший со старыми, выведенными из предположения о равенстве скоростей молекул, был просто физически абсурден: получалось, что вязкость газа не зависела от его давления!

— Этот вывод из математической теории является крайне поразительным, — говорил Максвелл, — и единственный опыт, с которым я встретился в этой области, как будто его не подтверждает...

Неплохое заявление для автора новой теории! Эта теория не давала пока никаких особенно новых результатов, за исключением, как всем казалось, заведомо неверного, и отношение к ней было прохладным. А ряд ученых прямо заявили, что эта теория ненаучна, спекулятивна, поскольку истинная наука не должна иметь дела с «ненаблюдаемыми» величинами.

Максвелл попал в самую горячую точку философских битв. Закон распределения молекул по скоростям, данный Максвеллом, оказался новым фундаментальным свойством материи, находящейся в равновесии, свойством, не известным ранее никому. Максвелл подошел к самым границам механического понимания материи. И переступил их. Вывод Максвелла о господстве в мире молекул законов теории вероятностей затрагивал самые фундаментальные основы мировоззрения. Одни философы полагали, что все в природе может быть объяснено на основе механических представлений. Но Максвелл всегда считал, что механическая модель лишь в самых общих и простых чертах отражает исследуемые процессы и явления природы. Любой механический образ, по Максвеллу, отражает природу отнюдь не тождественно, а с определенной степенью приближения, отражает лишь одну сторону ее свойств. Механические модели, механические представления играли у Максвелла роль рабочих гипотез, конструкций, помогающих изобразить сложные предметы и явления гораздо проще и наглядней. Механические модели были строительными лесами его теорий.

Невозможность объяснить многие вновь открытые закономерности чисто механическим путем (не один физик сломал зубы, пытаясь механически представить второй закон термодинамики!) привели к появлению другой теории — феноменологической. Сторонники ее призывали изучать мир таким, как он есть, упорядочивать и описывать опытные данные, не вдаваясь в «спекуляции», умствования,

не строя никаких моделей, не подтвержденных опытом. Эти стали абсолютизировать уже опыт и ощущения. С ними Максвелл, столько времени потративший на теорию цветов, и убедившийся в крайней субъективности ощущений — сравните ощущения дальтоника и нормального человека! — никак не мог бы согласиться. Их с Максвеллом разделяла глубочайшая убежденность его в конечной познаваемости мира, в возможности объяснения даже самых сложных явлений.

Нельзя было ограничиваться чисто феноменологическим описанием. С другой стороны — невозможно было абсолютизировать и гипотетическое описание. Избрав середину, Максвелл пришел к методу аналогий, при котором можно было привлекать физические отношения в уже изученных явлениях и впервые учитывать данные, характеризующие новые явления. И поскольку из старых отраслей науки именно механика была наиболее разработанной, то механические аналогии, как самые наглядные, самые ясные и понятные, были вполне уместны и закономерны. И тут — главное. Механические модели были для Максвелла правомерны лишь до тех пор, пока они подтверждали то, что наблюдалось в экспериментах. Он был готов отказаться от своего вывода о независимости коэффициента внутреннего трения газов от давления, вывода математически безупречного, ввиду казавшегося тогда очевидным несовпадения этого вывода с экспериментом.

Будучи по складу своего мышления физиком, твердо уверенным в объективном и независимом от субъекта существовании окружающего мира, будучи уверенным во всеобщей взаимосвязи и изменчивости явлений, в их многоликости и «многослойности», Максвелл буквально на каждом шагу демонстрировал диалектичность своего мышления, и введение им совершенно немыслимых с позиций механицизма вероятностных, статистических методов в молекулярную теорию доказало зрелость его философских концепций, мощь философских обобщений. Заявление о том, что в мире молекул «господствует случай», было по своей смелости одним из величайших подвигов в науке.

Описание закона взаимодействия молекул при использовании статистических методов оказалось делом чрезвычайно сложным. Даже самый простой случай — случай двух упругих шарообразных сталкивающихся молекул — приводил к невообразимым математическим трудностям.

И все-таки Максвелл решил задачу. Его решение выглядело обескураживающе дерзким: Максвелл решил приспособить молекулы к решению, а не наоборот. Больцман был потрясен остроумием максвелловского подхода. Он сравнивал работу Максвелла с величественной музыкальной драмой:

«Математики узнают стиль Коши, Гаусса, Якоби или Гельмгольца, прочитав всего несколько страниц, точно так же как музыканты с первых тактов узнают Моцарта, Бетховена или Шуберта. Элегантное совершенство выражений принадлежит, конечно, французу; правда, оно часто сочетается с некоторой немощью в построении умозаключений; высшая драматическая мощь свойственна англичанам, и больше всех — Максвеллу. Кто не знает его динамическую теорию газов?

Сначала величественно выступают вариации скоростей, затем выступают, с одной стороны, уравнения состояния, а с другой — уравнения центрального движения, и все выше вздымается хаос формул, но вдруг звучат четыре слова: «Возьмем $n = 5$». Злой

демон V (относительная скорость двух молекул) исчезает так же внезапно, как неожиданно обрывается в музыке дикая, до сих пор все подавлявшая партия басов. Как от взмаха руки кудесника упорядочивается то, что раньше казалось неукротимым. Не к чему объяснять, почему произведена та или другая подстановка: кто этого не чувствует, пусть не читает Максвелла. Он не автор программной музыки, который должен комментировать свои ноты. Стремительно раскрывают перед нами формулы результат за результатом, пока нас не ошеломит заключительный эффект — тепловое равновесие тяжелого газа, и занавес падает».

Эту красивую цитату, однако, нельзя понимать слишком буквально. Гениальность Максвелла отнюдь не сводилась к остроумию. Ее основой была раскованность его ума, колоссальный багаж знаний и удивительная физическая интуиция. Людвиг Больцман понимал это, может быть, лучше, чем кто-нибудь другой, поскольку сам был великим физиком. Именно ему суждено было завершить и развить статистические идеи Максвелла, распространив их на контингент более общих случаев, и ввести в повседневный обиход физиков «статистику Максвелла—Больцмана», описывающую распределение скоростей молекул в разных условиях.

ТЕМА №3

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Литература

[Р1]. Гл. II, VI.
[Р2]. §§ 19 – 27.
[Р3]. Гл. II, III.
[Р4]. Гл. 10, 13.
[Р5]. Гл. II.
[Р6]. Гл. II.2, II.4.
[Р7]. Гл. II.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Полная и внутренняя энергии системы .
2. Теплота и работа. Механический эквивалент теплоты.
3. Теплоемкость вещества. Классическая теория теплоемкости.
4. Теплоемкость идеальных газов. Теплоемкость газов и число степеней свободы молекул.
5. Первое начало термодинамики. Применения первого начала термодинамики к изопроцессам в идеальном газе.
6. Адиабатный процесс. Уравнения Пуассона.
7. Политропический процесс. Уравнение политропы.
8. Измерение количества теплоты и теплоемкости.
9. Равновесные состояния. Обратимые и необратимые процессы .
10. Круговые процессы (циклы). Цикл Карно.
11. Второе начало термодинамики.
12. Энтропия. Энтропия при обратимых процессах в замкнутой системе.

13. Энтропия при необратимых процессах в замкнутой системе. Закон возрастания энтропии.
14. Физический смысл энтропии. Энтропия и вероятность. Статистическое истолкование второго начала термодинамики.
15. Скорость звука в газах. Стоячие звуковые волны.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для восстановления гладкости льда на катках применяют поливку его горячей водой. Почему холодная вода для этого не пригодна?
2. Какой ветер, зимний или летний, при одной и той же скорости обладает большей мощностью?
3. Почему мокрые вещи не горят?
4. Укажите основания, дающие право рассматривать живой человеческий организм как тепловую машину.
5. Почему вода в сосуде, закрытом крышкой, закипает быстрее, чем в открытом?
6. Почему при распиливании дерева пила нагревается до более высокой температуры, чем дерево?
7. В бутылку льют воду. Струя воды производит при этом шум, в котором все-таки можно уловить некоторый определенный тон. По мере наполнения бутылки водой этот тон становится выше. Объясните это явление.
8. Чем объясняется облачко тумана, которое появляется у горлышка бутылки с охлажденным лимонадом или шампанским сразу, как только её открывают?
9. Теплота способна переходить только от тела, более нагретого; к телу, менее нагретому. Температура нашего тела выше температуры воздуха в натопленной комнате. Почему же нам в такой комнате тепло?
10. Если теплота есть не что иное, как движение молекул, то чем отличается горячий покоящийся бильярдный шар от холодного, но быстро движущегося?
11. Почему в жаркий летний день вода в реке прохладнее песка на берегу, ведь солнце греет их одинаково?
12. Что обладает большей внутренней энергией: 1 кг твёрдого или 1 кг расплавленного олова при температуре плавления и почему?
13. Почему сырые спички не загораются?
14. После сильного шторма вода в море становится теплее. Почему?
15. Почему при вколачивании гвоздя в дерево шляпка его мало нагревается, а когда гвоздь вбит, достаточно нескольких ударов, чтобы сильно нагреть шляпку?
16. Куда расходуется кинетическая энергия движущегося вагона при остановке?
17. Сначала ударили молотком по куску стали — молоток отскочил, затем так же ударили молотком по куску свинца — молоток отскочил меньше. Какому металлу при этом было передано больше энергии? (Кинетическую энергию молотка в момент удара считать в обоих случаях одинаковой.)
18. Почему выскакивают искры при ударе кремня о сталь? Почему от вращающегося точильного камня летят искры, если прижать к нему кусок стали?
19. Почему при холостых выстрелах ствол пушки нагревается сильнее, чем при стрельбе

снарядами?

20. Сжатая спиральная пружина обладает большей энергией, чем несжатая. Если растворить пружину в сжатом состоянии в кислоте, то ее потенциальная энергия исчезнет. Но ведь энергия исчезнуть бесследно не может! Как разъяснить парадокс?
21. При изотермическом сжатии идеального газа его температура не изменяется, а следовательно, не изменяется и кинетическая энергия его молекул. Так как между молекулами идеального газа нет сил притяжения и отталкивания, то при сжатии не изменилась и потенциальная энергия. Но ведь сжатый газ приобретает способность совершить некоторую работу, т. е. обладает дополнительной энергией. Как разрешить это противоречие?

КАК ВЫ ДУМАЕТЕ

1. Каково философское значение первого начала термодинамики?
2. В каких формах существует энергия?
3. Может ли внешняя энергия тела без внешнего воздействия перейти в его внутреннюю энергию?
4. Связаны ли друг с другом внешняя и внутренняя энергии тела?
5. Существуют ли ограничения для взаимного превращения различных видов энергии?
6. Имеет ли ограничение превращения внешней энергии во внутреннюю абсолютное значение?
7. Имеет ли понятие об изолированной системе абсолютный характер?
8. Является ли относительность изолированных систем объективной?
9. Почему термодинамические процессы являются необратимыми, хотя в их основе лежит полностью обратимое механическое движение молекул идеального газа?
10. Если система может описываться какими-либо законами, следует ли из этого, что каждый ее элемент подчиняется действию этих законов?
11. Является ли необратимость физическим принципом?
12. Может ли маловероятная конфигурация возникнуть в результате естественного развития системы?
13. В чем проявляется необратимость времени в молекулярной физике?
14. Задается ли направление времени каким-либо физическим процессом?
15. Позволяют ли статистические законы физики прогнозировать определенные процессы?

Проверь себя!

1. Два шарика одинаковой массы — свинцовый и стальной — падают с одинаковой высоты на песок. При этом

   a) больше нагреется тот шарик, теплоемкость материала которого меньше, т.е. свинцовый;
   b) больше нагреется тот шарик, теплоемкость материала которого больше, т.е. стальной;

c) оба шарика нагреются одинаково, так как, поскольку шарики падают с одинаковой высоты и массы их равны, то выделяются одинаковые количества теплоты.

2. В жаркий летний день вода в реке прохладнее песка на берегу, хотя солнце греет их одинаково. Это происходит из-за того, что

a) теплопроводность воды больше теплопроводности песка;
b) теплоемкость воды больше теплоемкости песка;
c) излучательная способность воды больше излучательной способности песка.

3. Ниппель велосипедной камеры нагревается, когда мы накачиваем ее

d) насосом;
e) от баллона со сжатым воздухом на станции техобслуживания;
f) как насосом, так и от баллона со сжатым воздухом на станции техобслуживания

5. Сильное действие взрывчатых веществ обусловлено
   a) их исключительно высокой удельной теплотой сгорания;
   b) быстротой их сгорания;
   c) огромным количеством запасенной в них энергии.
6. РАБОТА И ТЕПЛОТА ОБЛАДАЮТ ТЕМ ОБЩИМ СВОЙСТВОМ, ЧТО
   a) они существуют лишь в процессе передачи (изменения) энергии, а их числовые значения существенным образом зависят от вида этого процесса;
   b) они оба являются микроскопическим способом передачи энергии;
   c) они оба являются макроскопическим способом передачи энергии.
7. При гашении пожаров
   a) кипяток гасит огонь быстрее, чем холодная вода, так как сразу отнимает от пламени теплоту парообразования и окружает огонь слоем водяного пара, затрудняющего доступ воздуха;
   b) холодная вода гасит огонь быстрее, так как, помимо затрат тепла на парообразование, она поглощает большое количество теплоты при нагревании до 100 ^{0}C;
   c) холодная вода и кипяток одинаково быстро гасят пламя.

7. Два одинаковых тела, нагретых до разных температур, приводятся в тепловой контакт друг с другом. Температуры тел уравниваются. При этом процессе энтропия системы

a) увеличивается;
b) уменьшается;
c) не изменяется.

Лабораторная работа №9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ C_P/C_V МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Цель работы: экспериментальное определение отношения C_p/C_v для воздуха.

Приборы и принадлежности: стеклянный баллон специальной конструкции; открытый манометр.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе требуется найти $\gamma = C_p/C_v$ для воздуха методом, который предложили Клеман и Дезорм в 1819 году (рис. 8).

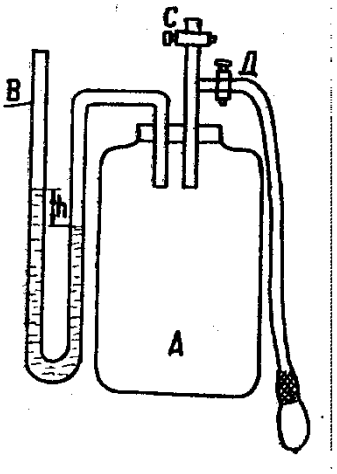


Рис. 8.

Суть метода, согласно замыслу Клемана и Дезорма, иллюстрирует рис. 9, на котором в координатах p–V приведены графики всех процессов эксперимента.

1. Кривая 0–1 соответствует подготовительному этапу – накачиванию воздуха в баллон. Число молей газа внутри баллона при этом возрастает. Отношение объема к числу молей в баллоне уменьшается, что и отражает кривая 0–1. Давление газа в баллоне увеличивается от атмосферного p_0 до некоторого давления p_1 . При сжатии работа газа A ~ $\Delta V<0$. Изменение внутренней энергии $\Delta E=Q - A$. В адиабатическом процессе ($Q=0$) повышение температуры $\Delta T \sim \Delta E>0$ будет максимальным. Реальный процесс сжатия, вообще говоря, сопровождается отдачей тепла во внешнюю среду ($Q<0$) , которую можно уменьшить, проводя накачивание достаточно быстро.

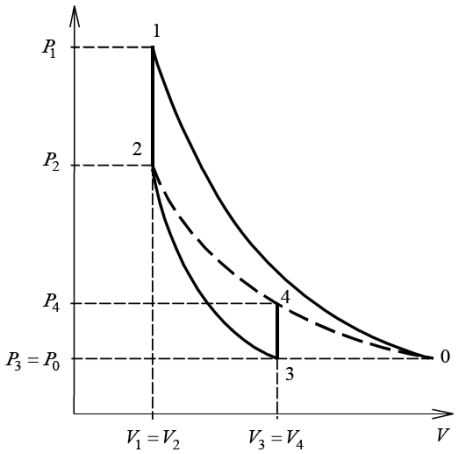


Рис. 9.

2. Как только накачивание прекращается, давление в баллоне начинает падать при неизменном объеме, что является следствием остывания газа (закон Шарля). На участке 1

– 2 температура снижается до комнатной за счет теплообмена с окружающей средой. Давление при этом уменьшается от p_1 до p_2 .

3. Когда давление перестает изменяться (точка 2), резко выпускаем воздух из баллона. Будем считать, что это адиабатическое расширение(кривая 2–3). В результате приведенный объем рассматриваемой массы газа увеличивается от $V_2=V_1$ до $V_3=V_4$, температура должна понизиться. Давление воздуха уменьшается от p_2 до атмосферного $p_3=p_0$.

4. Затем на участке 3 – 4 объем газа выдерживаем постоянным – еще один изохорический процесс. В точке 3 температура была ниже комнатной и теперь она повышается до комнатной за счет теплообмена с окружающей средой.

5. Заметим, что в точках 0, 4, 2 газ имеет одинаковую температуру – комнатную, т.е. эти точки лежат на одной изотерме 0–4–2 (которую иногда называют «мысленной» или «гипотетической», подчеркивая, что реально изотермического процесса 0–4–2 не происходило). Это обстоятельство позволило Клеману и Дезорму обойтись без измерения начального и конечного объемов газа.

Рассмотрим ход работы. Стеклянный баллон А, плотно закрытый пробкой, сообщается с открытым манометром В и имеет трубку С с краном Д. Через трубку С в сосуд А вдувают некоторое количество воздуха и закрывают кран Д. Через несколько секунд в сосуде устанавливается определенное давление, несколько выше атмосферного давления Н (выраженного в делениях манометра): $p_1 = H + h_1$, где h_1 —разность уровней жидкости в манометре В. При этом воздух имеет объем V_1 и температуру t_1, равную температуре воздуха в комнате. Затем открывают на короткое время кран Д, дают возможность воздуху в сосуде А расшириться (часть воздуха выпускают наружу). Это расширение происходит быстро, можно считать его адиабатическим (происходит без теплообмена с окружающей средой). При этом газ совершает работу против внешних сил, температура его понижается, т. е. $t_2<t_1$, масса газа, ранее заключавшаяся в сосуде, займет объем V_2, а давление воздуха в сосуде становится равным атмосферному:

$$p_2 = H \qquad (1)$$

Затем, при закрытом кране воздух в сосуде, благодаря теплообмену, постепенно нагревается до комнатной температуры, давление при этом повышается и через некоторое время устанавливается

$$p_3 = H + h_2, \qquad (2)$$

где h_2 — разность уровней в манометре Температура равна комнатной t_1, а объем V_2.

Итак, имеем три состояния в баллоне:

первое состояние $p_1=H + h_1$, V_1, t_1;

второе состояние $p_2 = H$, V_2., $t_2<t_1$;

третье состояние $p_3 = H + h_2$, V_2., t_1.

Переход газа из первого состояния во второе — адиабатический, т.е. удовлетворяет уравнению Пуассона

$$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma} \tag{3}$$

где $\gamma = C_p / C_v$.

Переход газа из первого состояния в третье — изотермический, т. е. удовлетворяет уравнению Бойля — Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_3 V_3 \tag{4}$$

Решая совместно уравнения (1) – (4), получим:

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3}$$

Так как p_1, p_2, p_3 мало отличаются друг от друга, то в первом приближении можно вместо разности логарифмов взять разность самих давлений:

$$\gamma = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3}$$

Или, учитывая (1), (2), (3),

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \tag{5}$$

По этой формуле легко найти требуемое отношение $C_p/C_v = \gamma$, отсчитав требуемое давление по манометру h_1 и h_2.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Открыв кран Д, осторожно вдуть в сосуд А воздух и закрыть кран.
2. Подождав, когда в сосуде установится постоянное давление, отсчитать разность уровней h_1 в манометре В.
3. Открыть на короткое время (около 0,5 сек.) кран С и, закрыв его, подождать, пока давление в сосуде установится.
4. Отсчитать разность давлений по манометру h_2.
5. Вычислить γ по формуле (5).
6. Опыт повторить 10 раз.
7. Из всех значений γ найти среднее.
8. Найти среднюю квадратичную, вероятную и относительную ошибки.
9. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа №10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ C_P/C_V МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Цель работы: экспериментальное определение отношения C_p/C_v.

Приборы и принадлежности: труба с миллиметровой шкалой, стеклянный сосуд, телефонная трубка, звуковой генератор ГЗ - 1.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения $\gamma = C_p/C_v$ пользуются установкой, изображенной на рис. 10. Здесь К - длинная миллиметровая труба с миллиметровой шкалой, сообщающаяся резиновым шлангом с сосудом S. К верхнему отверстию трубы прикреплена телефонная трубка Т, обращенная мембраной к трубе К. В боковую стенку стеклянной трубы вставлена трубочка М, соединенная с наушниками. Катушки электромагнита телефонной трубки Т подключены к выходным клеммам звукового генератора. Когда возбужденный генератором ток протекает через катушки телефонной трубки, ее мембрана приходит в вынужденные колебания и начинает издавать звук.

Воздушные звуковые волны, распространяясь в трубе К, отражаются от поверхности воды. Перемещая уровень воды вверх или вниз, можно добиться резонанса, то есть максимального звучания воздушного столба, заключенного в трубке (рис. 10).

Длину звуковой волны можно вычислить, измерив расстояние $l = l_n - l_{n-1}$, на которое должен переместиться уровень воды в трубке К при переходе от одной точки с максимальным звучанием к следующей:

$$\lambda = l = l_n - l_{n-1} \qquad (1)$$

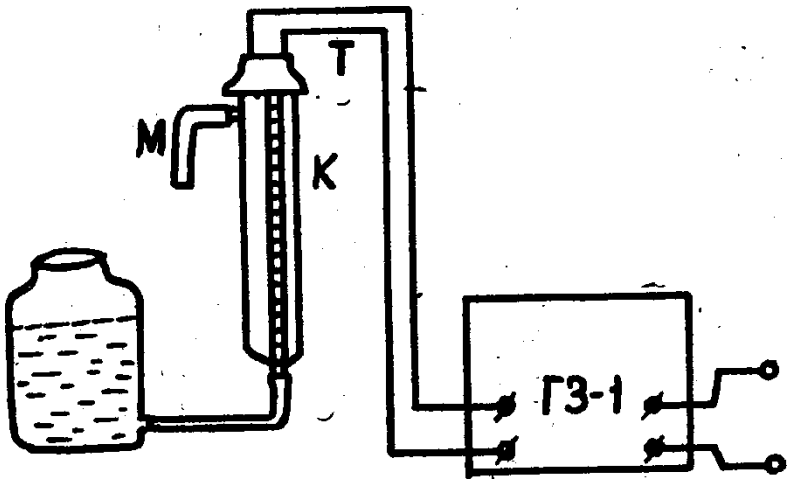


Рис. 10.

Зная частоту звука ν, можно вычислить среднюю скорость звука по формуле

$$v_{ср} = 2\nu l \qquad (2)$$

Тогда значение $\gamma = C_p/C_v$ *можно рассчитать по формуле*

$$\gamma = \frac{Mv_{cp}^2}{RT} \qquad (3)$$

Здесь М – молярная масса.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Включить звуковой генератор ГЗ–1 в сеть.
2. Добиться резонанса, перемещая уровень воды вверх или вниз.
3. Измерить расстояние *l*, на которое должен переместиться уровень воды в трубке К при переходе от одной точки с максимальным звучанием к следующей.
4. Вычислить длину звуковой волны по формуле (1).
5. Повторить 5-7 раз измерения расстояния *l*.
6. Вычислить среднюю скорость звука $v_{ср}$.
7. Определить $\gamma = C_p/C_v$ по формуле (3).
8. Повторить измерения п.п. 2-7, взяв две другие частоты.
9. Определить среднее значение $\gamma_{ср} = (\gamma_1+\gamma_2+\gamma_3)/3$.
   Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа №11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННЫХ ДАВЛЕНИИ И ОБЪЕМЕ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ [30]

Цели работы: изучить процесс распространения звуковой волны; измерить скорость звука в воздухе при различных температурах и определить отношения теплоемкостей воздуха.

Оборудование: экспериментальная установка ФПТ 1-7.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-7 показан на рис. 11.

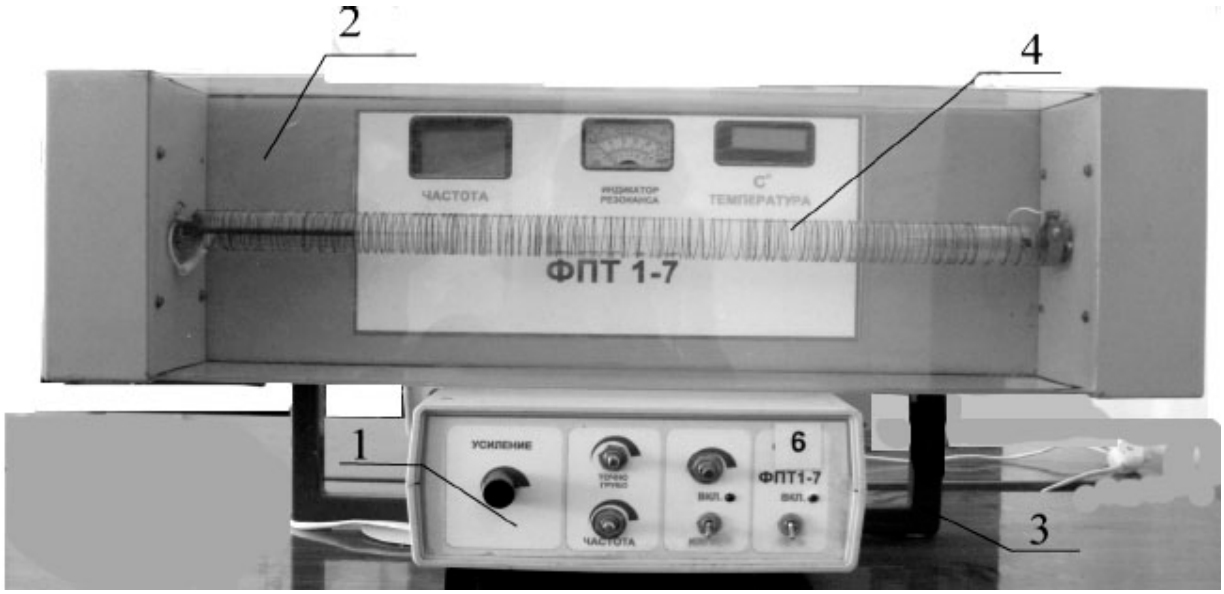


Рис. 11.

Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-7

1 - блок приборов, 2 - блок рабочего элемента; 3 - стойка; 4 - труба с нагревателем

Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную трубу длиной L, на торцах которой размещены телефон и микрофон. Температуру воздуха в трубе можно изменять с помощью нагревательной спирали, навитой на трубу. Мощность нагревателя устанавливается регулятором «Нагрев», находящимся на передней панели блока приборов 1. Температура воздуха в трубе измеряется полупроводниковым термометром и регистрируется на цифровом индикаторе «Температура». В блоке приборов расположен генератор звуковых колебаний, подключенный к телефону, возбуждающий звуковые колебания в трубе. Частота колебаний, заданная звуковым генератором, регулируется ручками «Грубо» и «Точно» и регистрируется на цифровом индикаторе «Частота», сигнал микрофона измеряется миллиамперметром, чувствительность которого регулируется ручкой «Усиление». Максимальные значения тока, зарегистрированные миллиамперметром во время плавного изменения частоты колебаний, соответствуют появлению резонанса в канале. Длина трубы L указана на рабочем месте.

Упругими волнами называются распространяющиеся в упругой среде механические возмущения (деформации). Если упругая волна распространяется в газе, находящемся в гладкой прямолинейной трубе с постоянным поперечным сечением, то, учитывая, что, в отличие от твердых тел, газы не оказывают сопротивления сдвигу, в них могут возникать только продольные волны, и, следовательно, скорость распространения упругой волны в газе можно вычислить по формуле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (1)$$

Здесь E – модуль упругости. ρ – плотность газа.

Определим величину E для газа. Если при действии силы F на некоторый объем газа давление в нем получит прирост Δp по отношению к давлению газа p в невозмущенном состоянии, то, по аналогии с законом Гука:

$$\Delta p = E\frac{\Delta V}{V}$$

Если считать изменения давления dp и объема dV бесконечно малыми, можно записать:

$$E = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} \qquad (2)$$

где знак «минус» будет означать, что увеличение давления соответствует уменьшению объема.

Пусть в газе распространяется звуковая волна, которая определяет собой упругую вону малой интенсивности, способную вызвать ощущение звука, с частотой от 16 до 20000 Гц. Колебания плотности в звуковой волне происходят так быстро, что теплообмен между слоями газа, имеющими различные температуры, не успевает произойти. Поэтому процесс распространения звуковой волны в газе можно считать адиабатным и к нему можно применить уравнение Пуассона $pV^{\gamma} = const$. Дифференцируя это уравнение и подставляя в (2), получим:

$$E = \gamma p \qquad (3)$$

Определив p из уравнения Менделеева-Клапейрона и подставляя в (3), получим:

$$E = \gamma\rho\frac{RT}{\mu} \qquad (4)$$

Подставив соотношение (4) в формулу (1), будем иметь формулу Лапласа для расчета скорости звука в газе:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$$

из которой вытекает:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{v^2 \mu}{RT} \tag{5}$$

Таким образом, для определения отношения теплоемкостей газа γ достаточно измерить его температуру и скорость распространения звука v в этом газе.

Скорость звука при данной температуре может быть определена резонансным методом. Во время распространения волны вдоль закрытого канала она многократно отражается от торцов, и звуковые колебания в канале – результат наложения этих отраженных волн. Если длина канала L равна целому числу полуволн $L = \frac{n\lambda}{2}$ (п – некоторое целое число, λ – длина волны), то волна, отраженная от торца канала, возвратившись к его началу и снова отражаясь, совпадает по фазе с падающей волной. Такие волны усиливают друг друга, амплитуда колебаний при этом резко возрастает, - наступает резонанс. При звуковых колебаниях слои газа, прилегающие к торцам канала, не испытывают смещения. В этих местах образуются узлы смещения, которые повторяются через λ/2 по всей длине канала. Между узлами находятся максимумы смещения (пучности).

Скорость звука v связана с частотой колебаний v и длиной волны λ соотношением v = λv, с учетом которого условие резонанса можно записать в виде:

$$2L\nu_0 = n\nu, \tag{6}$$

где ν_0 - резонансная частота.

Зависимость (6) резонансной частоты от номера резонанса n может быть проверена экспериментально. Изменяя частоту колебаний при постоянной длине канала, необходимо построить график зависимости $\nu_0 = f(n)$, по угловому коэффициенту которого $K = \frac{\nu}{2L}$ определяют скорость звука.

Измерения и их обработка

1. Включить установку тумблером «Сеть».
2. Ручки «Грубо» и «Точно» установить в крайнее левое положение. Ручкой «Усиление» отрегулировать чувствительность миллиамперметра (стрелка должна быть приблизительно на трети шкалы).
3. Плавно увеличивая с помощью ручек «Грубо» и «Точно» частоту колебаний, заданных звуковым генератором, определить частоту 1-го резонанса по наибольшему отклонению стрелки на шкале миллиамперметра. Результат измерений занести в таблицу измерений.
4. Постепенно увеличивая чувствительность миллиамперметра ручкой «Усиление», определить частоту 2, 3, 7 резонансов. Производя измерения при уменьшении частоты,

убедиться в повторяемости результатов. Результаты измерений занести в таблицу измерений.

5. Включить тумблер «Нагрев» и регулятором температуры нагрева достичь температуры воздуха в трубе t_2 = 40-45 °С. После стабилизации температуры произвести измерения по пунктам 2-4.

6. Увеличивая нагрев, достичь температуры воздуха в трубе t_3 = 55-60 °С. После стабилизации температуры произвести измерения по пунктам 2-4.

7. Регулятор температуры нагрева вывести в крайнее левое положение, выключить тумблер «Нагрев», ручки «Усиление», «Грубо» и «Точно» установить в крайнее левое положение, после чего выключить установку тумблером «Сеть».

8. Построить график зависимости резонансной частоты от номера резонанса $v_0 = f(n)$ для каждой из температур и определить угловые коэффициенты K для каждого графика.

9. Для каждого значения температуры воздуха в трубе, используя полученные угловые коэффициенты K_a„ определить скорость звука v по формуле v = 2LK и отношение теплоемкостей по формуле (5).

Оценить погрешность результатов измерения.

Таблица

р резонанса	t_1 = °С			t_2 = °С			t_3 = °С		
	v, Гц	v, м/с	γ	*v*, Гц	v, м/с	γ	*v*, Гц	v, м/с	γ

Лабораторная работа №12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРАЩЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

Цель работы**: определение приращения энтропии при плавлении.**

Приборы и принадлежности: тигельная печь; тигель с оловом; термопара; милливольтметр, проградуированный на градусы; латунный сосуд с маслом; термометр; секундомер.

Описание экспериментальной установки

В данной работе рассматривается изменение энтропии при плавлении олова. Процесс плавления олова происходит при постоянной температуре — температуре плавления и является изотермическим. Изменение энтропии в этом случае можно найти по формуле

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T}\int_1^2 dQ$$

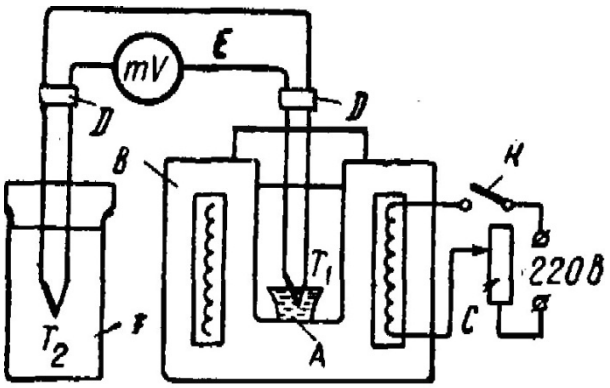


Рис. 12.

Определение приращения энтропии олова при его плавлении проводится следующим образом. Тигель А с оловом (рис. 12) помещают в тигельную печь *B* (дана в разрезе). С – лабораторный автотрансформатор, *D* – держатели из текстолита для термопар, Е – термопара, F – латунный сосуд с маслом, mV – милливольтметр или гальванометр, проградуированный на градусы, К – ключ. Измерение температуры проводится термопарой Е, один спай которой находится в тигле с оловом А при температуре $T_1 = T_п$, а спай второй – в сосуде с маслом (термостате) F при постоянной температуре $T_2=T_к$. Температура T_2 известна. Концы термопары присоединяются к милливольтметру mV, шкала которого проградуирована на градусы температуры T_1 для определенного значения T_2. Температура T_2 практически комнатная. Термопарой Е измеряют температуру олова. Количество теплоты Q_1, которое надо затратить, чтобы нагреть олово от комнатной (начальной) температуры $T_к$ до температуры плавления $T_п$

$$Q_1 = \int_{T_к}^{T_п} cmdT$$

где *c* и *m* – теплоемкость и масса олова.

Количество теплоты Q_2, необходимое на плавление олова при температуре плавления $T_п$ ($T_п$ = const), равно:

$$Q_2 = \lambda m,$$

где λ – удельная теплота плавления олова.

Приращение энтропии при плавлении олова можно подсчитать по формуле:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{dQ}{T}$$

Подставим вместо Q его значение $Q_1 + Q_2$. Получим:

$$\Delta S = \int_{T_к}^{T_п} \frac{cm}{T} dT + \frac{\lambda m}{T_п} = cm \ln \frac{T_п}{T_к} + \frac{\lambda m}{T_п} \qquad (1)$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Собрать схему (рис. 12).
2. Включить цепь печи (замкнуть ключ *К)* и довести олово до жидкого состояния.
3. Расплавление олова наблюдают непосредственно при открывании крышки печи.
4. Измерить температуру $T_п$ плавления олова по милливольтметру mV.
5. Вычислить по формуле (1) приращение энтропии при плавлении олова.

Величины с и λ берут из таблиц, $T_к = T_2 = t_0 + 273°$, где t_0 — комнатная температура, $T_п = T_1$ получают из эксперимента в момент плавления олова.

Лабораторная работа №13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА [30]

Цель работы: определить изменение энтропии при фазовом переходе первого рода на примере плавления олова.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка ФПТ 1-11.

Описание экспериментальной установки

Для определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова предназначена экспериментальная установка ФПТ 1-11, общий вид которой показан на рис. 13.

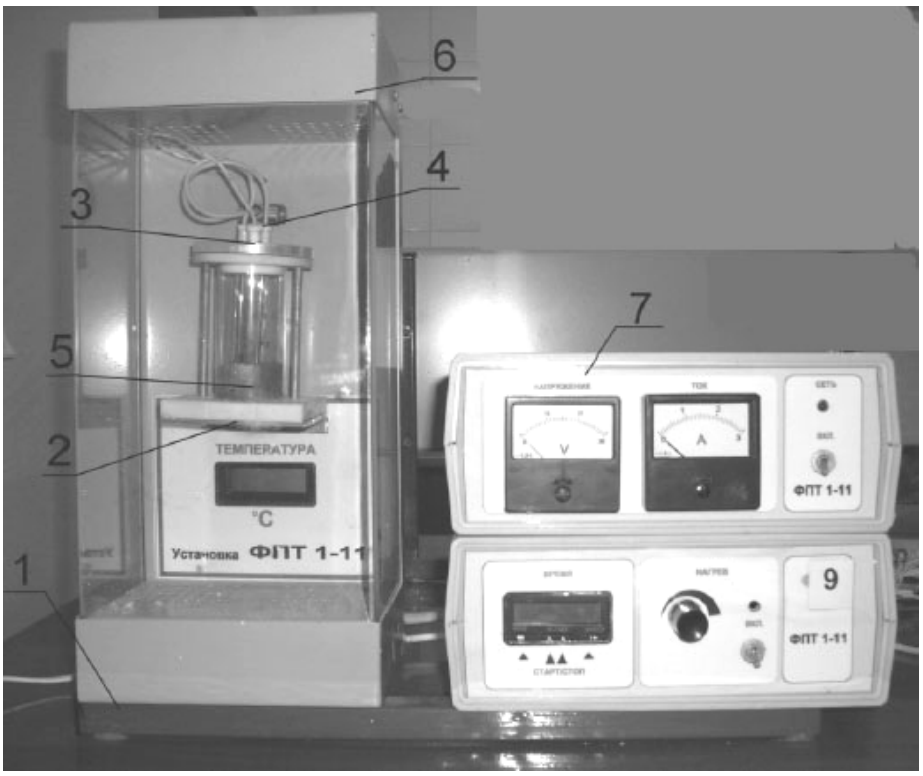


Рис. 13..

Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-11

1 – стойка; 2 – кронштейн; 3 – нагреватель; 4 – датчик температуры; 5 – тигель с исследуемым материалом; 6 – блок рабочего элемента; 7 – блок приборов.

Нагревание олова происходит в тигле с помощью электрического нагревателя 3, источник питания которого размещен в блоке приборов 7. Температура олова измеряется цифровым термометром, расположенным в блоке рабочего элемента 6. Время нагрева измеряется цифровым секундомером, расположенным в блоке приборов *7*. Секундомер приводится в действие при включении питания блока приборов.

Наиболее простыми примерами фазовых переходов первого рода являются плавление и испарение. Эти процессы происходят квазистатически при постоянных давлении и температуре. При плавлении и испарении вещество поглощает теплоту, а его энтропия в жидком состоянии при данных температуре и давлении больше, чем в твердом, а в газообразном больше, чем в жидком. Фазовый переход первого рода – фазовое превращение, сопровождающееся поглощением или выделением некоторого количества скрытой теплоты и изменением удельного объема вещества; температура перехода остается постоянной и зависит от давления. Процесс плавления олова протекает при постоянной температуре $T = T_n$ и, следовательно, является изотермическим. Изменение энтропии при нагревании и плавлении олова можно определить как сумму изменений энтропии при нагревании его от начальной температуры T_k до температуры плавления T_n по формуле:

$$\Delta S = cm\ln\frac{T_n}{T_k} + \frac{\lambda m}{T_k} \qquad (1)$$

Формула (9.3) может быть использована для экспериментального определения изменения энтропии при нагревании и плавлении олова после измерения значения температур T_k и $T_п$.

Измерения и их обработка

1. Включить установку тумблером «Сеть» и измерить начальную температуру олова T_k.
2. Одновременно включить нагреватель и запустить секундомер и через каждую минуту измерять температуру олова. Измерения проводить до тех пор, пока температура не достигнет постоянной величины $T_п$, а затем начнет увеличиваться. Результаты измерений отмечать на графике $T = ft)$.
3. Выключить нагреватель и провести аналогичные измерения при охлаждении олова, отмечая температуру на том же графике, что и в пункте 2.
4. Выключить установку тумблером «Сеть».
5. По двум полученным графикам определить температуры, соответствующие участкам графиков, параллельным оси времени, и по их среднему значению найти температуру плавления олова.
6. По формуле (1) определить изменение энтропии во время нагревания и плавления олова. Удельную теплоту плавления и удельную теплоемкость олова найти в справочниках.
7. Оценить погрешность результатов измерений.

.

Это интересно

Биологическая термодинамика [4]

Важнейшее свойство живых организмов заключается в их способности улавливать, преобразовывать и запасать энергию в различных формах. Общие законы, определяющие превращения энергии, изучаются термодинамикой. Законы термодинамики универсальны для неживой и живой природы, но, формулируя их, мы не исследуем конкретной сущности процессов, происходящих при нагревании воды или при развитии эмбриона. Термодинамика наука феноменологическая (от слова «феномен» – явление). Феноменологические теории, в отличие от атомно-молекулярных, изучают закономерности, не связанные с конкретной структурой вещества.

Любую часть окружающего нас мира, которую мы хотим исследовать и описать с позиций термодинамики, называют системой. В качестве примера интересующих нас термодинамических систем можно назвать клетку, митохондрию, сердце, организм, биосферу. Следует, однако, отметить, что методы термодинамики приложимы только к макроскопическим системам, состоящим из большого числа частиц. Система, которая не может обмениваться со средой ни энергией, ни веществом, называется изолированной;

если происходит обмен только энергией, то система называется замкнутой, а если и энергией и веществом - открытой. Живой организм в целом система открытая. И лишь в отдельных частях клетки могут существовать условия, характерные для замкнутой и даже изолированной системы.

Применимость первого закона термодинамики к живым системам была продемонстрирована в начале этого века Рубнером. В серии работ с микроорганизмами Рубнер показал, что энергия, поступающая в бактерии с пищей, разделяется в процессе потребления на две части: 1) выделяющуюся в среду в виде тепла и энергии, содержащейся в продуктах жизнедеятельности; 2)запасаемую в клеточном материале (эта энергия выявляется с помощью сжигания объектов в калориметрической бомбе). Сумма этих двух частей равна внутренней энергии поступающей пищи. Аналогичные экспериментальные подтверждения первого начала термодинамики были получены Этуотером при изучении теплового баланса человека с помощью калориметра, представляющего собой изолированную камеру, куда помещался человек.

Изменение тепловой энергии ΔQ изолированной системы пропорционально абсолютной температуре (Т); коэффициент пропорциональности называется изменением энтропии (ΔS): $\Delta Q = T\Delta S$. Согласно второму закону термодинамики, энтропия изолированной системы возрастает в необратимом процессе и остается неизменной в обратимом процессе. Рост энтропии при самопроизвольных процессах означает переход системы, состоящей из большого числа молекул, в более вероятное состояние.

Из второго закона термодинамики следует невозможность превратить при постоянной температуре тепловую энергию в механическую работу. Работа связана с однонаправленным перемещением тел (зарядов и масс), т. е. с движением всех входящих в данное тело молекул в одном направлении. Именно поэтому кинетическую энергию летящего тела в принципе можно целиком превратить в работу. В работу можно превратить электрическую энергию, представляющую собой однонаправленное движение ионов или электронов в электрическом поле. Тепловая энергия обусловлена хаотическим движением частиц, сумма векторов скорости которых в любом направлении равна нулю. Поэтому кинетическая энергия этого теплового движения частиц не может быть непосредственно использована для работы.

Рассмотрим превращение энергии в живой клетке. Солнечные лучи, поглощаясь зеленым листом, осуществляют процессы фотосинтеза, при которых энергия света превращается в химическую энергию, «запасенную» в органических соединениях, например, в глюкозе. Химическая энергия глюкозы превращается в ходе клеточного окисления частично в тепло, а частично - в другую форму химической энергии, в энергию макроэргических связей АТФ. За счет гидролиза АТФ может происходить перенос веществ из области меньшей в область большей концентрации (осмотическая работа), перенос ионов в область более высокого электрического потенциала (электрическая работа), в организме животного – сокращение мышц (механическая работа). При этом происходит перевод части химической энергии АТФ в осмотическую, электрическую и механическую энергию.

Электрическая, осмотическая и химическая энергии могут быть использованы для совершения работы, т. е. для направленного перемещения тела против действующих на

него сил. Количественной мерой превращения этих видов энергии служит изменение называемой свободной энергии. Тепловая энергия при постоянной температуре не может быть использована для совершения работы. Протекание химических реакций в жидкой фазе не изменяет давления, но может вызывать изменение объема. Поэтому для таких систем вместо изменения внутренней энергии системы используется изменение ее энтальпии (ΔH), которое равно $\Delta U + p\Delta V$. Между изменением свободной энергии ΔG и изменением энтальпии ΔH при постоянном давлении и температуре существует соотношение, вытекающее из первого и второго законов термодинамики:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \qquad (1)$$

В физико-химических системах изменение свободной энергии обычно описывают через изменение электрохимического потенциала $\overline{\mu}$:

$$\Delta G = \nu \cdot \Delta\overline{\mu} \qquad (2)$$

где ν – количество вещества (моли) в системе. Изменение электрохимического потенциала при переходе системы из состояния 1 в 2 определяется изменением химической, осмотической и электрической энергий:

$$\Delta\overline{\mu} = \mu_{02} - \mu_{01} + RT\ln(c_2 / c_1) + zF(\varphi_2 - \varphi_1) \ . \qquad (3)$$

Физический смысл электрохимического потенциала заключается в том, что его изменение равно работе, которую необходимо затратить, чтобы:

а) синтезировать 1 моль вещества (состояние 2) из исходных веществ (состояние 1) и поместить его в растворитель (слагаемое $\mu_{02} - \mu_{01}$),

б) сконцентрировать раствор от концентрации c_1 до c_2 (слагаемое RT1n(c_2/c_1),

в) преодолеть силы электрического отталкивания, возникающие при наличии разности потенциалов ($\varphi_2 - \varphi_1$) между растворами [слагаемое $zF(\varphi_2 - \varphi_1)$].

Заметим, что эти слагаемые могут быть как положительными, так и отрицательными.

Рассмотрим в качестве примера, как изменяется величина электрохимического потенциала при переносе ионов Na через мембрану нервной клетки. Этот процесс совершается ферментом Na^+, K^+-АТФ-азой и обеспечивается энергией гидролиза АТФ. Ион натрия при этом переносится из клетки наружу. Концентрация Na^+ внутри клеток (c_1) равна 0,015 моль/л, а снаружи (c_2) - 0,15 моль/л. Осмотическая работа на каждый моль перенесенного иона равна при 37^0 С RT1п (0,15/0,015) =5,9 кДж/моль.

Внутри клетки электрический потенциал составляет φ_1=–60 мВ, если принять наружный потенциал φ_2=0. Электрическая работа составляет: $zF\Delta\varphi = 9{,}65 \cdot 10^4$ Кл/моль · 60 · 10^{-3} В = 5,8 кДж/моль. (F – заряд моля одновалентных ионов (число Фарадея) $F = N_A \cdot e$ = 9,65·10^7 Кл/кмоль). Так как с Na^+ при его переносе через мембрану в конечном счете не происходит никаких химических превращений и он оказывается примерно в таком же

водном окружении, что и раньше, то $\Delta\mu_0$=0. Отсюда по уравнению (3) находим $\Delta\mu$ = 0 + 5,9 + 5,8 = 11,7 кДж/моль.

Второй закон термодинамики гласит, что в изолированной системе не может увеличиваться свободная энергия. Иначе говоря, в системе, где $\Delta H = 0$ [см. уравнение (1)], $\Delta G = -T\Delta S \leq 0$. Пока энергетические превращения в данной системе сопровождаются переходами разных видов энергии друг в друга без их перехода в тепло, $\Delta G = 0$, все эти процессы обратимы. Как только часть энергии превратится в тепловую, процесс становится необратимым в той степени, в которой произошел этот переход. Понятие обратимости процесса тесно связано с понятием динамического равновесия. Равновесие – это такое состояние системы, при котором каждая частица может переходить из некоторого состояния 1 в некоторое состояние 2 и обратно, но в целом доля состояний 1 и состояний 2 в системе не изменяется. В физико-химических (а следовательно, биологических) системах равновесны процессы, при которых $\Delta\overline{\mu} = \Delta G / \nu = 0$, т.е

$$\mu_{02} - \mu_{01} + RT\ln(c_2 / c_1) + zF(\varphi_2 - \varphi_1) = 0 \qquad (4)$$

В равновесии могут находиться субстраты (А) и продукты (В) биохимической реакции или ионы по две стороны мембраны.

Для определения термодинамических параметров биологических систем используются два метода: определение теплопродукции (калориметрия) и измерение констант равновесия. Так как объект, находящийся в калориметре, не производит работы, изменение энергии (энтальпии) можно считать равным количеству выделившегося тепла ΔQ. Так находят изменение энтальпии (ΔH), например, в ходе изучаемого биофизического процесса или биохимической реакции. Существует также другой подход к изучению термодинамических параметров процесса, основанный на измерении констант равновесия при разных температурах. Этот метод пригоден только в том случае, когда ни изменение энтальпии системы (ΔH), ни изменение энтропии (ΔS) от температуры не зависят.

В литературе неоднократно высказывалось удивление по поводу того, что в живых организмах в ходе их роста и развития может происходить увеличение упорядоченности, которое, казалось бы, противоречит второму закону термодинамики. Противоречие это кажущееся. С одной стороны, понятие энтропии вообще нецелесообразно использовать, тогда речь идет о порядке в макроскопическом смысле, скажем, о дифференциации клеток, специализации клеточных структур и т. д. С другой стороны, организм постоянно совершает работу и растет, следовательно, общее количество свободной энергии в нем должно увеличиваться, что на первый взгляд противоречит второму закону термодинамики. Такой вывод, однако, основан на недоразумении. Свободная энергия не может увеличиваться лишь в изолированных системах. Ни один живой организм не является изолированной системой. Организм питается и с пищей (а растения и со светом) потребляет свободную энергию, которую потом расходует. В полном смысле слова изолированной можно считать систему организм – среда. Внутри такой системы в ее «живой» части, т. е. в организме, свободная энергия может увеличиваться, а энтропия –

соответственно уменьшаться, но при непременном условии одновременного его увеличения в неживой части системы. Так, например, развитие зеленых растений на Земле происходило благодаря увеличению энтропии в системе Солнце – Земля. Известно, что и в состоянии покоя, и при выполнении работы может происходить рост и развитие организма, но одновременно идет непрерывное выделение тепла живыми организмами. Эта теплота диссипации представляет собой результат окисления веществ, заключенных в пище, которое сопровождается ростом энтропии, значительно большим, чем снижение энтропии за счет роста организма и дифференцировки его клеток.

Итак, изменение свободной энергии в ходе любого процесса определяет направление этого процесса: он идет в сторону уменьшения G. Например, для гидролиза фосфатной связи в комплексе Mg^{2+}– АТФ при pH 7,0 и 37^0 С по схеме АТФ + H_2O → АТФ + Ф (где Ф - ион фосфорной кислоты) получено значение ΔG = –30,5 кДж/моль. В реакции АДФ+H_20 → АМФ + Ф, ΔG= –30 кДж/моль. Значительное понижение свободной энергии при гидролизе АТФ и АДФ побудило биохимиков назвать эти соединения богатыми энергией, или макроэргическими. Однако в живой клетке протекает множество реакций, которые сопровождаются увеличением свободной энергии ($\Delta G>0$). Основной способ преобразования энергии в клетке: химическая работа совершается путем подключения к реакции с «неблагоприятным» изменением свободной энергии реакций с большим отрицательным изменением свободной энергии. Чтобы осуществлять такое «сопряжение» процессов, клетке пришлось создать в ходе эволюции специальные молекулярные «энергопреобразующие» устройства, которые представляют собой ферментные комплексы, как правило, связанные с мембранами.

При применении термодинамики к биологическим системам необходимо учитывать особенности организации живых систем: 1) биологические системы открыты для потоков вещества и энергии; 2) процессы в живых системах в конечном счете имеют необратимый характер; 3) живые системы далеки от равновесия; 4) биологические системы гетерофазны, структурированы и отдельные фазы могут иметь небольшое число молекул.

Все это отличает биологические системы от изолированных и близких к состоянию равновесия систем, в которых рассматриваются обратимые процессы в гомогенной среде, содержащей огромное множество молекул. Для более адекватного описания свойств биологических систем во многих случаях полезно применение термодинамики необратимых процессов, основателями которой считают лауреатов Нобелевской премии по химии Л. Онзагера и И. Пригожина.

В отличие от классической термодинамики, в термодинамике необратимых процессов рассматривается ход процессов во времени. Фундаментальное понятие классической термодинамики - равновесное состояние. В термодинамике необратимых процессов столь же важным понятием можно считать стационарное состояние системы.

Различие между равновесием и стационарным состоянием хорошо видно на примере ионного баланса клетки. Концентрация K^+ внутри клеток теплокровных примерно в 15 раз выше, чем во внеклеточной среде, но это не приводит к выходу этих ионов из клетки, так как на клеточной мембране имеется потенциал со знаком минус внутри клетки, который удерживает K^+ от выхода из цитоплазмы. Система близка к равновесию, условия которого

описываются известным уравнением Нернста.

Иная ситуация с ионами Na^+. Их концентрация в клетке примерно в 15 раз меньше, чем в окружающей среде. Постоянный градиент концентрации и разность потенциалов на мембране приводят к тому, что имеется хотя и небольшое, но постоянное просачивание ионов Na^+ в клетку. Тем не менее постоянная концентрация ионов Na^+ в клетке поддерживается насосами, выкачивающими этот ион и работающими за счет энергии гидролиза АТФ. Из этого примера видно, что в отличие от термодинамического равновесия стационарное состояние характеризуется:

1) постоянным притоком веществ в систему и удалением продуктов обмена (в данном случае – приток АТФ и удаление Na^+);

2) постоянной затратой свободной энергии, которая поддерживает постоянство концентраций веществ в системе;

3) постоянством термодинамических параметров (включая внутреннюю энергию и энтропию) системы, находящейся в стационарном состоянии.

Система в стационарном состоянии является открытой системой и может существовать лишь за счет притока энергии извне (в форме АТФ в нашем примере) и оттока энергии в окружающую среду (в нашем случае в форме тепла). В биологических системах наиболее важными потоками являются потоки вещества и электрических зарядов.

Онзагер сформулировал основы термодинамики, описывающей одновременное протекание различных взаимосвязанных стационарных процессов. Экспериментальной основой этой термодинамики являются феноменологические законы, устанавливающие наличие линейной зависимости между потоками и силами их вызывающими Положительное значение диссипативной функции как критерий возможности сопряжения потоков означает, что в любом преобразователе энергии входная мощность должна превышать выходную. В большинстве биологических процессов происходит преобразование химической энергии в осмотическую, электрическую и механическую. Во всех этих процессах происходит диссипация части химической энергии в тепло.

Термодинамика линейных необратимых процессов, т. е. процессов, где потоки и силы связаны линейно, объясняет особенности открытых систем - сопряжение потоков и возникновение стационарных неравновесных состояний. Важным вопросом теории стационарного состояния является вопрос о критериях такого состояния. В термодинамике линейных необратимых процессов доказывается, что стационарное состояние может быть охарактеризовано следующим принципом, получившим название ***теоремы Пригожина:*** в стационарном состоянии при фиксированных внешних параметрах скорость продукции энтропии в системе постоянна по времени и минимальна по величине.

Критерий эволюции системы в классической термодинамике состоит в том, что энтропия для необратимых процессов в изолированной системе стремится к максимальной величине ***(критерий Клаузиуса).*** В открытой системе производство энтропии для необратимых процессов стремится к минимуму ***(критерий Пригожина).*** Из

теоремы Пригожина следует, что если система по той или иной причине выведена из стационарного состояния, то она будет изменяться до тех пор, пока удельная скорость продукции энтропии не примет наименьшего значения, т. е. достигает минимума диссипативная функция. Теорема Пригожина разрешила важнейший для термодинамики линейных необратимых процессов вопрос о точной характеристике стационарного состояния открытой системы, что резко расширило область применения этого раздела термодинамики.

ТЕМА №4

СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

ЛИТЕРАТУРА

[Р1]. Гл . VII.

[Р2]. §§ 34, 35.

[Р3]. Гл. IX.

[Р4]. §§ 92 – 94.

[Р5]. Стр. 226—244.

[Р6]. Гл. II.6.

[Р7]. Гл. II.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Объемные свойства жидкостей.
2. Методы определения коэффициента объемного расширения: а) с помощью дилатометра; б) метод Дюлонга и Пти; в) метод сообщающихся сосудов.
3. Зависимость коэффициента теплового расширения жидкостей от давления и температуры.
4. Явления переноса в жидкостях.
5. Явления на границе жидкости. Поверхностное натяжение.
6. Условия равновесия на границе двух сред. Краевой угол. Смачивание.
7. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Уравнение Лапласа.
8. Капиллярные явления.
9. Методы измерения коэффициента поверхностного натяжения.
10. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.
11. Испарение и кипение жидкостей.
12. Температурная зависимость упругости насыщенных паров.
13. Абсолютная и относительная влажность. Методы измерения влажности воздуха.
14. Упругость насыщенного пара над кривой поверхностью жидкости.
15. Испарение и кипение жидкостей.

КАЧЕСТВЕННЫЕ ВОПРОСЫ

1. В ветреный день нам становится теплее, если мы «спрячемся» от ветра. А одинаковы ли показания термометра на ветру и «за углом» ?

2. Перед походом ботинки несколько раз пропитывают жиром. С какой целью?
3. Каждая капля пролитой в водоемы и моря нефти покрывает непроницаемой пленкой 20 $м^2$ водной поверхности. Как с точки зрения физики и знаний о строении вещества объяснить этот факт? Какие последствия для обитателей водных просторов может иметь образование такой пленки?
4. В жидкий азот погружают металлическую гайку комнатной температуры. Азот закипает, потом кипение прекращается, но затем интенсивность кипения резко увеличивается. Почему?
5. Где продукты сохнут быстрее – в холодильнике или на открытом воздухе? Почему? Какие предметы сохнут в холодильнике быстрее – холодные или теплые? Какие «предметы охлаждаются в холодильнике медленнее, «сухие» или «влажные», и почему?
6. У водомерки на концах ножек расположены волоски, благодаря которым увеличивается площадь опоры, и она не проваливается в воду. Но если на ее пути окажется пятно из керосина или масла, то она опустился в воду. Почему?
7. Чем объясняется моющее действие мыла? Почему при стирке моющими средствами образуется пена?
8. Как сделать ткань водоотталкивающей?
9. Если на поверхности воды положить нитку и с одной стороны капнуть эфиром, то нитка будет перемещаться. Почему это происходит, и в какую сторону она будет перемещаться?
10. Вылив на поверхность разбушевавшегося моря некоторое количество нефти, можно в этом месте «успокоить» водную стихию. Почему?
11. Деревянный кружок, покрывающий воду, легче снять, поднимая его не плашмя, а ребром. Почему?
12. При удалении с поверхности ткани жирного пятна рекомендуется смачивать пропитанной бензином ваткой края пятна, а не само пятно. Почему?
13. Если достать из холодильника банку с газированной водой и открыть ее, то вода сразу замерзнет. Почему?
14. В жарких странах напитки помещают в сосуды с пористыми стенками. Зачем это делают?
15. Куда будет двигаться капля смачивающей и несмачивающей жидкости в горизонтально расположенном коническом капилляре?
16. Хлопчатобумажный и шерстяной мотки ниток намочили в воде и повесили сушиться. Почему через некоторое время (минут десять) в шерстяном мотке почти вся вода оказалась собранной в его нижней части, в то время как в хлопчатобумажном она была распределена более или менее равномерно по всему мотку?
17. При смачивании жидкостью твердого тела сила притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем сила притяжения между молекулами самой жидкости. Вода смачивает стекло, а ртуть его не смачивает. Почему же для отрывания стеклянной пластинки от поверхности ртути требуется приложить большую силу, чем для отрывания ее от поверхности воды?
18. Известен следующий опыт: деревянный брусок, покрытый слоем парафина, кладут на дно стеклянного стакана, придерживают вязальной спицей и наполняют стакан водой. Если убрать спицу, брусок не всплывает. Не выполняется закон Архимеда. Как же так, ведь дерево погружено в воду и на него должна действовать архимедова сила?

19. Почему прочны мыльные пузыри? У какой воды коэффициент поверхностного натяжения больше: у чистой или у мыльной?
20. Почему, если дохнуть себе на руку, получается ощущение тепла, а если дунуть, то ощущение прохлады?
21. Чем ниже температура, тем большее количество воды должно выпасть в виде росы (или изморози) из каждого кубического метра воздуха (при прочих равных условиях). Температура воздуха зимой на улице ниже, чем в комнате. Однако в некоторых старых домах стены обмерзают со стороны комнаты, а не с улицы. Как объяснить этот парадокс?

КАК ВЫ ДУМАЕТЕ

1. Каковы качественные и количественные различия между жидкостью и газом?
2. Имеют ли критерии различия между жидкостью и газом абсолютный характер?
3. Являются ли черты сходства и различия между жидкостью и ее паром универсальными для всех веществ?
4. Имеет ли деление форм существования вещества на твердые тела, жидкости и газы абсолютный смысл?
5. Можно ли рассматривать изменение агрегатного состояния вещества как физическую форму движения?
6. От чего зависят практические возможности человека в использовании законов поверхностного натяжения?
7. В чем заключаются количественная и качественная стороны такой физической величины, как сила поверхностного натяжения?
8. Чем определяется смысл используемого нами понятия «давление Лапласа» - теорией или экспериментом?
9. Что такое наблюдение и чем оно отличается от эксперимента?
10. Каково объективное содержание понятия «свободная энергия поверхности»?
11. Существуют ли в природе абсолютно смачиваемые поверхности?
12. В рамках какой структуры условий справедливо уравнение Лапласа?
13. Можно ли абсолютно точно определить коэффициент объемного расширения?
14. Какова идеальная модель жидкости?
15. Может ли вещество, являющееся в одной системе отсчета жидкостью, превращаться в другой системе отсчета в газ?

ПРОВЕРЬ СЕБЯ!

1. Если стекло имеет трещину, то зимой непосредственно около трещины
    a) оно не обмерзает, хотя вся остальная поверхность стекла обмерзает;
    b) оно обмерзает сильнее, чем вся остальная поверхность стекла;
    c) оно обмерзает так же, как и вся остальная поверхность стекла..
2. Длина пеньковой веревки, лежащей на земле, при смачивании
    a) увеличивается;
    b) уменьшается;
    c) не изменяется.
3. При увеличении абсолютной влажности перед дождем, как правило,

a) плотность воздуха увеличивается, так как сырой воздух содержит больший процент молекул воды, чем сухой;
b) уменьшается, так как сырой воздух получается из сухого посредством замены некоторых молекул кислорода и азота молекулами воды;
c) не изменяется, так как в литре сырого воздуха содержится столько же молекул, сколько в литре сухого (при данной температуре и данном давлении).

4. При выведении жирных пятен утюгом материал, впитывающий жир, надо располагать
   a) со стороны утюга;
   b) на стороне, противоположной утюгу;
   c) с обеих сторон ткани.
5. Устранение жирных пятен с ткани нагреванием основано на температурной зависимости коэффициента
   a) поверхностного натяжения;
   b) диффузии;
   c) текучести.
6. Если сравнивать сырую и кипяченую воду, то при одинаковых условиях
   a) сырая вода закипает раньше, так как она содержит в растворе воздух;
   b) кипяченая вода закипает раньше, так как не содержит воздуха;
   c) сырая и кипяченая вода закипают одновременно.
7. Конденсация водяных паров
   a) происходит одинаково хорошо как на нейтральных, так и на заряженных телах, если их температуры одинаковы
   b) лучше происходит на нейтральных телах
   c) лучше происходит на заряженных телах

Лабораторная работа №14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ КЕРОСИНА

***Цель работы**: экспериментальное определение коэффициента объемного расширения керосина.*

Приборы и принадлежности: прибор для измерения коэффициента объемного расширения, горелка, термометр.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Метод основан на использовании равновесия двух столбов жидкости в сообщающихся сосудах, когда жидкости в них имеют различную температуру. В этом случае высоты столбов обратно пропорциональны плотностям жидкости в них. Схема прибора показана на рис. 14.

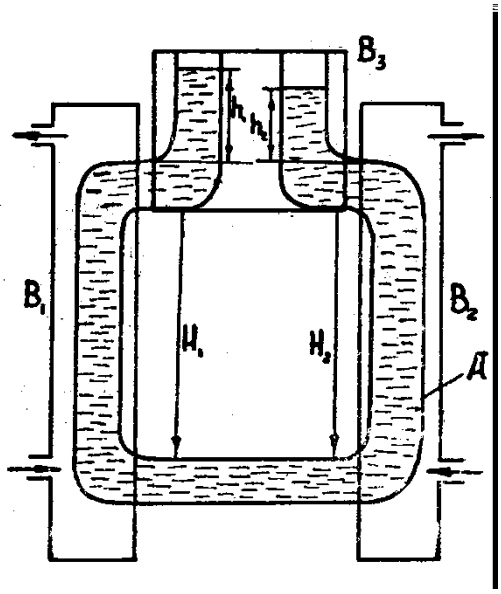


Рис. 14.

Исследуемая жидкость заполняет трубку А, которой придана показанная на рисунке форма. Открытые концы трубки соединены вместе для удобства отсчета разности уровня. Оба вертикальных колена трубки помещаются в термостаты B_1 и B_2, представляющие собой сосуды, через которые пропускается вода с заданной температурой. С помощью этих сосудов— «рубашек» устанавливается требуемая разность температур жидкостей в обоих коленах трубки. Благодаря этому и плотности жидкости в них будут различны. Высоты обоих колен одинаковы, поэтому $H_1 = H_2 = H$.

Имея в виду, что давление столба жидкости равно произведению плотности жидкости на ускорение свободного падения g и на высоту столба, мы можем написать, что разность давлений вертикальных колен равна $H(\rho_2 - \rho_1)g$, где ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкости в правом (холодном) и левом (горячем) коленах. Эта разность давлений уравновешивается разностью уровней $h_1–h_2$, благодаря которой возникает разность давлений $p_1–p_2$. Можно, следовательно, написать очевидное равенство

$$H(\rho_2–\rho_1) = (h_1–h_2)\rho_2 \qquad (1)$$

Объем жидкости при некоторой температуре t связан с объемом V_0 той же жидкости при некоторой другой температуре известным соотношением:

$$\mathbf{V_t= V_0(l + \alpha\Delta t),}$$

где $\Delta t = t – t_0$ и α – коэффициент теплового расширения. В применении к нашему случаю эта формула имеет вид:

$$V_{11} = V_{12} (1 + \alpha\Delta t), \text{ или } V_{11} / V_{12} = 1 + \alpha\Delta t,$$

где t_1 и t_2 – температуры левого и правого колена, а $\Delta t = t_1 – t_2$.

Отношение плотностей жидкости в обоих коленах обратно пропорционально отношению объемов. Поэтому

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{1+\alpha\Delta t} \qquad \textbf{или} \qquad \rho_1 = \frac{\rho_2}{1+\alpha\Delta t}$$

Подставив это значение ρ_1 в формулу (1), мы без труда получим:

$$\alpha = \frac{h_1 - h_2}{[H-(h_1-h_2)]\Delta t} = \frac{\Delta h}{(H-\Delta h)\Delta t} \qquad \textbf{(2)}$$

Измерения и их обработка

1. Включить горелку и нагреть воду в одном колене до указанной преподавателем температуры. Установить требуемую разность температур жидкостей в обоих коленах трубки.
2. Измерить температуры в холодном и горячем коленах.
3. Измерить разность уровней жидкостей h_1–h_2 в холодном и горячем коленах.
4. Измерить H.
5. Вычислить коэффициент объёмного расширения керосина по формуле (2).
6. Повторить п.п. 1– 5 несколько раз.
7. Произвести математическую обработку результатов измерений и расчетов.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа №15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА

Цель работы: определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ**: ВЕСЫ ЖОЛИ; КРИСТАЛЛИЗАТОР С ВОДОЙ; КОЛЬЦО; ВЕСЫ ТЕХНИЧЕСКИЕ; РАЗНОВЕСЫ.**

Описание экспериментальной установки

Поверхностное натяжение можно измерить силой, необходимой для разрыва поверхностного слоя жидкости

$$F = \alpha l,$$

где F – сила разрыва, l – длина линии разрыва, α – коэффициент, характеризующий поверхностное натяжение этой жидкости при данных условиях, т. е. коэффициент поверхностного натяжения.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 15.

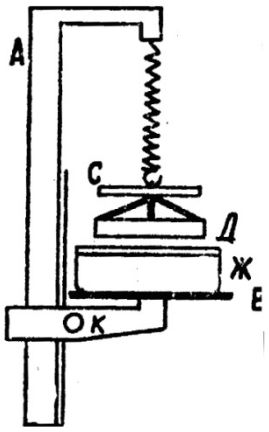


Рис. 15.

Тщательно промойте кольцо спиртом, чтобы удалить с поверхности случайные загрязнения. Следует помнить, что даже небольшое количество посторонних веществ, способно существенно изменить результаты. После промывки надо дать подсохнуть спирту, т. к. он сам влияет на величину поверхностного натяжения воды. Наполните кювету водой. Поставив кювету на столик, медленно поднимайте столик до тех пор, пока поверхность воды не коснется кольца. Во время опыта надо следить за тем, чтобы нижний обрез кольца коснулся воды всеми краями одновременно. Медленно спуская столик, внимательно следят за диском и его изображением в зеркале. В момент отрыва кольца от поверхности замечают соответствующее деление шкалы. Чтобы определить ту силу, которую нужно приложить для отрыва кольца от поверхности жидкости, на чашку весов кладут столько груза, чтобы проволочка растянулась до того же деления, при котором произошел отрыв кольца от жидкости.

Пусть вес груза будет P. При помощи штангенциркуля или микрометрического винта измеряют толщину кольца и его внешний диаметр. Полученные результаты подставляют в формулу

$$\alpha = \frac{P}{2\pi(D-h)}$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Тщательно промыть кольцо спиртом, чтобы удалить с поверхности случайные загрязнения.
2. После промывки дать подсохнуть спирту, т. к. он сам влияет на величину поверхностного натяжения воды.
3. Наполнить кювету водой.
4. Поставив кювету на столик, медленно поднимать столик до тех пор, пока поверхность воды не коснется кольца. Во время опыта надо следить за тем, чтобы нижний обрез кольца коснулся воды всеми краями одновременно.

5. Медленно спуская столик, внимательно следить за диском и его изображением в зеркале.
6. В момент отрыва кольца от поверхности заметить соответствующее деление шкалы.
7. Определить силу F, которую нужно приложить для отрыва кольца от поверхности жидкости, с помощью весов и разновесов. Для этого па чашку весов положить столько груза, чтобы проволочка растянулась до того же деления, при котором произошел отрыв кольца от жидкости.
8. Измерить толщину кольца и его внешний диаметр (штангенциркулем или микрометром).
9. Вычислить коэффициент поверхностного натяжения.
10. Повторить п.п. 4-10 пять раз.
11. Произвести математическую обработку результатов эксперимента.
    Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа №16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РАСТВОРА ПО МЕТОДУ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПУЗЫРЬКЕ

Цель работы: изучение зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора от его концентрации и температуры.

Приборы и принадлежности: аспиратор; спиртовой манометр; сосуд в форме пробирки с боковым отверстием и пробкой; трубка с оттянутым концом; два стакана; термометр; электроплитка; мешалка; штатив; набор исследуемых жидкостей.

Описание экспериментальной установки

Прибор (рис. 16) состоит из наполненного водой аспиратора А, соединенного с помощью резиновых трубок и четырехконечной трубки С с манометром М и с верхним воздушным пространством плотно закрытого сосуда В, в котором находится некоторое количество исследуемой жидкости. Через отверстие в пробке в этот сосуд вводится так называемый «кончик», представляющий собой стеклянную трубку, нижний конец которой оттянут так, что выход канала трубки весьма узок. Этот «кончик» помещается на уровне испытуемой жидкости так, чтобы он соприкасался с ее поверхностью. Сосуд В помещается для поддержания или изменения температуры в стакан, наполненный водой, который может подогреваться. Четвертый отросток α четырехконечной трубки, который может закрываться, соединяет всю эту систему с атмосферой.

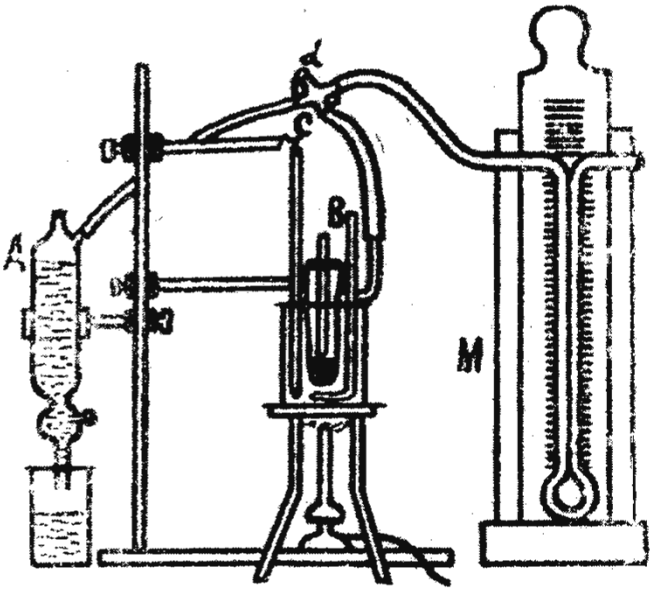


Рис. 16.

Если, закрыв отросток α, слегка приоткрыть кран аспиратора, то вода начнет медленно вытекать из него, и в верхней части аспиратора, а, следовательно, и в соединенных с ней верхней части сосуда В и левом колене манометра образуется разреженное пространство. При некотором определенном разрежении избыток атмосферного давления проталкивает через «кончик» в сосуд В пузырек воздуха. Это происходит тогда, когда разность давления атмосферного воздуха и воздуха в сосуде В, измеряемая разностью высот уровней жидкости в коленах манометра, уравновешивает давление, вызываемое поверхностным натяжением испытуемой жидкости, стремящимся сжать образующийся пузырек.

Обозначим эту разность давлений через Н, а коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости — через α.. Тогда в момент отрыва пузырька между ними будет существовать следующее соотношение:

$$\alpha = A.H, \qquad (1)$$

где А - коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров «кончика», т.е. величина постоянная для данного прибора.

Для определения ее необходимо произвести опыт с какой-либо жидкостью, поверхностное натяжение которой хорошо известно, например, с водой. Тогда, подставив соответствующие значения H_0 и α_0 в формулу (1), будем иметь:

$$A = \alpha_0 / H_0 \qquad (2)$$

Определив таким образом постоянную прибора, можно перейти к определению поверхностного натяжения любой жидкости, которое выразится теперь формулой

$$\boldsymbol{\alpha = \alpha_0 (H/H_0)} \qquad \textbf{(3)}$$

Измерения и их обработка

Упражнение 1. **Определение постоянной прибора.**

1. Собрать прибор согласно рис. 16.
2. Налить в аспиратор воды до уровня бокового отростка и дистиллированной воды в сосуд В до уровня, указанного на рисунке.
3. Открыть отросток α соединительной стеклянной трубки, устанавливая этим внутри прибора атмосферное давление. Уровни жидкости в коленах манометра при этом выравниваются.
4. Передвигая шкалу манометра, установить нулевое деление ее на общий уровень спирта в коленах.
5. Закрыть отросток α.
6. Открыть кран аспиратора настолько, чтобы изменения давления происходило достаточно медленно.
7. Отсчитать высоты уровней в манометре в момент отрыва пузырька.
8. Когда частота образования пузырьков установится, начать производить отсчеты по манометру, отмечая высоту уровня в обоих коленах.
9. Произвести отсчёты не менее чем для десяти пузырьков.
10. Найти среднее значение H_0.
11. Одновременно производить отсчет температуры в стакане с водой, в который погружен сосуд В.
12. Взять из таблиц или графиков значение α_0 для данной температуры.
13. Найти постоянную прибора по формуле (2).
14. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Упражнение 2. **Определение зависимости α от концентрации растворов.**

1. Вылить воду из сосуда В.
2. Прополоскать сосуд и особенно «кончик» раствором метилового спирта в воде.
3. Наполнить сосуд раствором метилового спирта в воде определенной концентрации.
4. Определить, как в упражнении 1, высоту Н.
5. Найти по формуле (3) соответствующее значение α..
6. Повторить измерения для нескольких растворов известной концентрации.
7. Построить график зависимости α от концентрации.
   Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Упражнение 3. **Определение зависимости α от температуры.**

1. Прополоскать сосуд В.
2. Наполнить сосуд В ксилолом.
3. Нагреть воду в стакане, в который погружён сосуд В, до $80\text{-}90^0$.
4. Дать воде возможность медленно остывать, производя через каждые 10 ^{0}C отсчёты температуры и высоты Н как в упражнении 1.
5. Определить α для нескольких температур.

6. Построить график зависимости α от температуры.
7. Произвести математическую обработку результатов эксперимента. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Лабораторная работа №17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: определение абсолютной и относительной влажности по точке росы и методом психрометра.

Приборы и материалы: гигрометр с термометром; серный эфир; каучуковая груша; стандартный аспирационный психрометр.

Упражнение №1. **Определение влажности по точке росы.**

Описание экспериментальной установки

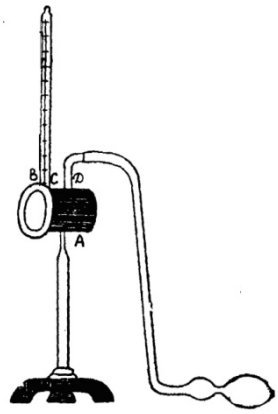


Рис. 17

Точкой росы называется температура, при которой водяной пар, имеющийся в воздухе, становится насыщенным, т. е. начинает конденсироваться на охлажденной поверхности. Наиболее простым конденсационным методом является метод на основе использования гигрометра Ламбрехта. Он состоит (рис. 17) из металлического сосуда А цилиндрической формы, укрепленного на подставке. Один торец сосуда отполирован и окружен таким же кольцом В, которое укреплено на теплоизоляционном материале. Сосуд имеет одно отверстие С и два патрубка Д и Е. Через отверстие С в сосуд наливается серный эфир, после чего оно закрывается пробкой с термометром. На патрубок Д надет резиновый, шланг с грушей для продувания воздуха через эфир. Воздух с парами эфира выходит через патрубок Е. Чтобы пары эфира не попадали в комнату, рекомендуется пропускать выходящий воздух через банку с водой. При пропускании воздуха эфир испаряется, его температура понижается, сосуд охлаждается. Это приводит к тому, что на полированной поверхности торца начинает появляться роса из водяного пара, окружающего воздух. Прибор необходимо установить так, чтобы полированный торец и кольцо были хорошо освещены. О моменте появления росы судят по потускнению

поверхности (по сравнению с кольцом) отполированного торца. Температуру t_1 начала этого потускнения необходимо, по возможности, точно определить по термометру. Уменьшая поток воздуха, замечают температуру t_2 исчезновения росы. Определение t_1 и t_2 производят не менее трех раз. За точку росы принимают среднее значение из полученных величин — так определяют t_p . Следует остерегаться влияния нашего дыхания на влажность прибора. Пользуясь таблицей «Давление и плотность насыщенных водяных паров при разных температурах», по величине t_p определяют значение абсолютной влажности, а по величине комнатной температуры $t_к$—давление насыщающих паров воды. Зная эти величины, определяют значение относительной влажности.

Измерения и их обработка

1. Установить прибор так, чтобы полированный торец и кольцо были хорошо освещены.
2. Определить по термометру по возможности точно температуру t_1 начала появления росы (по потускнению поверхности отполированного торца).
3. Уменьшать поток воздуха до исчезновения росы.
4. Измерить температуру t_2 исчезновения росы.
5. Произвести определение t_1 и t_2 не менее трех раз.
6. Принять за точку росы среднее значение из полученных величин.
7. Определить значение абсолютной влажности.
8. Определить по таблице, измерив комнатную температуру, давление насыщающих паров воды.
9. Вычислить значение относительной влажности воздуха.

Упражнение № 2. **Метод психрометра.**

Описание экспериментальной установки

Метод психрометра — наиболее распространенный метод измерения влажности воздуха. Сущность его состоит в следующем: пусть два одинаковых термометра находятся в одинаковых потоках воздуха. Показания этих термометров, естественно, должны быть одинаковыми. Если же баллончик одного из термометров будет все время смочен, например, обернут мокрым батистом, то показания термометров будут различными. Благодаря испарению воды с батиста так называемый «мокрый» термометр показывает температуру более низкую, чем «сухой» термометр. Чем меньше влажность окружающего воздуха, тем интенсивнее будет испарение и тем ниже показания мокрого термометра. Отсчеты по двум термометрам дадут разность температур, которая и будет характеризовать влажность воздуха. При установившемся режиме испарения, когда температура мокрого термометра тоже установится, приток тепла извне Q_1 будет равен расходу тепла Q_2 на испарение воды с поверхности термометра. По закону Ньютона за единицу времени имеем:

$$\mathbf{Q_1 = \alpha\,(t—t_1)\,S_1} \qquad \mathbf{(1)}$$

где $(t—t_1)$ — наибольшая разность температур, S_1 — поверхность баллончика мокрого термометра, α — коэффициент пропорциональности.

По закону Дальтона испарение в единицу времени определяется выражением

$$M = \frac{cS_2(p_H - p)}{P} \qquad (2)$$

где M — масса испарившейся воды, S_2—площадь испаряющей поверхности, P — давление воздуха, $p_н$ — упругость насыщающего водяного пара при температуре испаряющейся жидкости, т. е. температуре t_1, p — упругость водяного пара, находящегося в воздухе, c — коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости потока воздуха.

Количество тепла Q_2 может быть записано в виде

$$Q_2 = Mr = \frac{crS_2(p_H - p)}{P} \qquad (3)$$

где r — удельная теплота испарения воды.

При $Q_1 = Q_2$ и $S_1 = S_2$ получим

$$\frac{cr(p_H - p)}{P} = \alpha(t - t_1)$$

откуда

$$p = p_H - A(t - t_1)P \qquad (4)$$

где A = α/cr — постоянная применяемого прибора. Величина этой постоянной определяется в основном скоростью потока и находится экспериментально.

Устройство применяемого стандартного аспирационного психрометра представляет собой два одинаковых специальных термометра, баллончик правого покрыт батистом. Аспиратор имеет пружинный, который заводится ключом. Скорость воздушных потоков вентилятора 2,5 м/с, выше баллончиков оба потока соединяются в один. Для устранения нагревания прибора его металлические части никелированы. Батист смачивается при помощи резиновой груши с пипеткой. Груша наполняется дистиллированной водой. Небольшим нажатием груши воду в пипетке поднимают, но не более чем на 1 см от конца пипетки. Такое положение уровня сохраняется благодаря зажиму. Крайне осторожно пипетка вводится в трубку для смачивания батиста. После этого открывают зажим, чтобы вода опустилась в грушу. Следует опасаться, чтобы при смачивании вода не попала на другой термометр и внутреннюю поверхность трубки. Ключом В заводят вентилятор (5—6 оборотов ключа) и следят за показанием термометра. Когда показания установятся (через 4—5 минут), их записывают, вентилятор при этом должен работать полным ходом. При отсчете показаний термометров следует прежде отсчитать десятые доли градусов и записать их и только после этого целые значения.

Абсолютная влажность по стандартному аспирационному психрометру определяется формулой

$$p = p_H - 0{,}000662\,(t - t_1)P \qquad (5)$$

Величину $p_н$ берут из таблицы «Давление и плотность насыщенных водяных паров при различных температурах». Барометрическое давление определяют, пользуясь барометром. Если из таблицы «Давление и плотность насыщенных водяных паров при различных температурах» взять величину давления насыщающего пара при температуре окружающего воздуха, то легко определить по стандартной формуле относительную влажность. Удобнее, однако, пользоваться специальными номограммами в виде кривых, с помощью которых, зная температуры t и t_1, сразу путем отсчета определяется величина относительной влажности. Относительная влажность по этой номограмме определяется как точка пересечения вертикальных прямых (температура «сухого» термометра) и наклонных прямых (температура «мокрого» термометра).

Измерения и их обработка

1. Смочить батист при помощи резиновой груши пипеткой.
2. Наполнить грушу дистиллированной водой
3. Поднять воду в пипетке, но не более чем на 1 см. от конца пипетки.
4. Ввести пипетку в трубку для смачивания батиста.
5. Открыть зажим, чтобы вода опустилась в грушу.
6. Следует опасаться, чтобы при смачивании вода не попала на другой термометр и внутреннюю поверхность трубки.
7. Завести вентилятор ключом (5-6 оборотов ключа)
8. Следить за показаниями термометра. Когда показания установятся (через 4-5 мин), записать их; вентилятор при этом должен работать полным ходом.
9. При отсчете показаний термометров прежде отсчитать десятые доли градусов и записать их, и только после этого целые значения.
10. Определить по формуле (5) абсолютную влажность.
11. Определить барометрическое давление, пользуясь барометром.
12. Определить относительную влажность, взяв величину давления насыщенного пара при температуре окружающего воздуха из таблицы.
13. Определить относительную влажность по номограмме определяется как точку пересечения вертикальных прямых (температура «сухого» термометра) и наклонных прямых (температура «мокрого» термометра).
14. Сравнить результаты измерений с результатами, полученными по методу точки росы.
15. Результаты измерений и расчетов занести в таблицы.

Это интересно

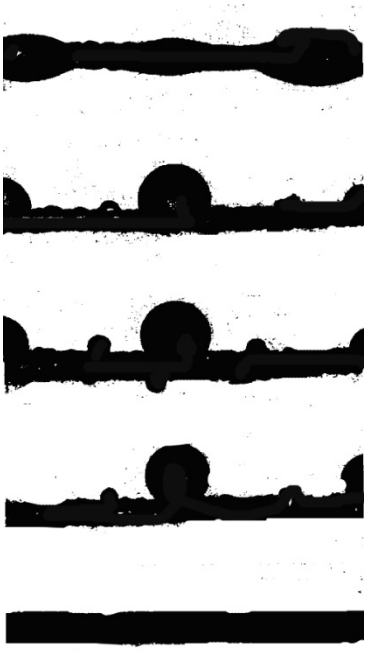
Как моет мыло? **[2]**

Вы, наверное, не раз наблюдали, как ведут себя капельки воды на поверхности стекла. Если стекло чистое, то капельки растекаются на его поверхности. А вот загрязненную поверхность стекла вода не смачивает. Капелька стремится сохранить свою форму и лишь слегка сплющивается в месте соприкосновения. Оказывается, что моющее действие мыла объясняется похожим эффектом. При растворении даже незначительного количества мыла в воде оно скапливается (адсорбируется) на границе воды с отмываемой поверхностью или тканью. В результате ослабляется прилипание частиц жира и грязи к

ткани. Тонкая пленка мыла на поверхности, например, жировой капли не дает ей возможности смачивать поверхность ткани.

На рисунке показана серия увеличенных фотографий шерстяной нити. На первой фотографии — нить, испачканная жидким парафином. Три следующие фотографии показывают очищающее действие раствора стирального порошка. Ясно видно, как увеличивается угол, образуемый поверхностью парафина с нитью. Парафиновый жир сворачивается в шарики и уносится водой. На самой нижней фотографии показана уже совсем чистая нить.

Адсорбированные молекулы мыла окружают капельки жира и отмываемую поверхность плотно заполненным одинарным (мономолекулярным) слоем, который обладает высокой механической прочностью. Молекулы мыла сильно связаны друг с другом, и разорвать пленку очень трудно. Поэтому при стирке пленки из адсорбированных молекул не разрушаются и препятствуют обратному прилипанию уже оторвавшихся капелек жира к поверхности ткани и слиянию капелек друг с другом. Взвешенные в воде частички грязи и капельки жира удаляются вместе с ней.



Интересно, что образование устойчивой пены — это только побочный эффект при растворении моющих веществ. Пена образуется из пузырьков воздуха, которые попадают внутрь воды (при перемешивании со струёй воды). Затем они всплывают к ее поверхности и оказываются окруженными пленкой жидкости и адсорбированным слоем мыла. Образованию устойчивой пены способствует высокая прочность мыльных пленок.

Механизм моющего действия представляет интерес и в связи с другими важными техническими задачами — покрытием поверхностей лаками и красками, склеиванием, окраской тканей суспензиями, изготовлением непромокаемых тканей. Например, для того чтобы сделать ткань водоотталкивающей, ее обрабатывают специальным веществом,

которое образует вокруг каждого волокна тонкую пленку. В результате вода не смачивает ткань, а собирается на ней в капли, которые скатываются с материала.

Адсорбционные пленки используют для уменьшения испарения воды с поверхности водоемов, что является важной проблемой в засушливых районах. Для создания защитных пленок применяют специальное вещество — гексадеканол. В обычных условиях это — твердое вещество, оно плавает на поверхности воды и возле него образуется защитный слой. Поверхность жидкости похожа на упругую растянутую пленку и всегда стремится уменьшить свою площадь. Поэтому на границе области с гексадеканол ом возникают силы поверхностного натяжения: со стороны чистой поверхности воды, стремящиеся уменьшить эту поверхность (и тем самым растянуть защитный слой), и со стороны самой адсорбированной пленки, стремящиеся уменьшить ее площадь. Будет ли защитная пленка растягиваться или сжиматься, зависит от соотношения этих сил.

Адсорбция уменьшает поверхностное натяжение. Поэтому силы поверхностного натяжения самой пленки меньше, чем у чистой поверхности воды, и пленка растягивается на всю площадь водоема. Если вся поверхность воды покрыта адсорбированным мономолекулярным слоем, то вещество не расходуется. Однако стоит пленке где-либо испортиться, как поверхностное натяжение в этом месте увеличится, стянет пленку с соседних участков и т. д. В результате нарушается пленка и возле плавающего кусочка вещества, которое и восстанавливает пленку.

Было найдено, что для создания защитной пленки на площади 1 га необходимо около 20 г гексадеканола, а потери в среднем равны 2—3 мономолекулярным слоям в день. Поэтому расход вещества для поддержания пленки составляет всего около 60 г в день на 1 га, и такой способ оказывается экономически выгодным. Например, в Австралии с его помощью ежегодно сохраняется около 10 миллионов литров воды с каждого гектара водной поверхности.

ТЕМА №5

ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Литература

[P1]. Гл. IX.

[P2]. §§ 44, 45.

[P6]. Гл. VII.1, VII.2.

[P7]. Гл. II.

Вопросы по теоретическому материалу

1. Основные свойства кристаллов и аморфных тел.
2. Кристаллическая решетка. Дефекты в кристаллах.
3. Механические свойства твердых тел. Деформации.

4. Упругая деформация и тепловое расширение.
5. Зависимость деформации от напряжения. Механизм пластической деформации.
6. Переход в твердое состояние.
7. Диаграмма состояния. Тройная точка.
8. Фазовые переходы первого и второго рода.
9. Растворение и кристаллизация из раствора. Зонная очистка металлов.
10. Опытное определение температуры плавления.
11. Тепловые свойства твердых тел. Квантовая теория теплоемкости твердых тел.
12. Измерение теплоемкости твердых тел.
13. Тепловое расширение твердых тел.
14. Теплопроводность твердых тел.
15. Диффузия в твердых телах.

Качественные вопросы

1. Если железный винт ввинтить в медную гайку и вместе с гайкой охладить, то вывинтить его почти невозможно. Почему?

2. Один из героев книги Г. Мало «Без семьи» поучал другого: «Если снег перестанет, может наступить сильный мороз». Верно ли это?

3. Есть такой фокус: на дне флакона лежат монеты. При переворачивании флакона монеты не выпадают. Как же фокусник умудрился засунуть монеты во флакон?

4. Катить санки по льду значительно легче, чем гладкую доску такого же размера и веса. Почему?

5. Как происходит, что камни путешествуют вверх на поверхность земли из подземных скальных пород? Ведь они имеют большую плотность, чем почва, и потому должны опускаться, а не подниматься. Что же толкает их вверх?

6. Как лепится снежок? Почему нельзя слепить снежок при очень низкой температуре?

7. Чем объясняется, что кристаллические вещества при действии внешней силы раскалываются только в определённых плоскостях?

8. Силы связи между атомами в большинстве кристаллов в разных направлениях различны. Объяснить, в каком направлении кристалл, опущенный в раствор или расплав того же вещества, будет расти быстрее.

9. Почему некоторые кристаллические вещества при нагревании изменяют свою форму?

10. Почему, если ртутный термометр поместить в пламя, ртутный столбик сперва опустится и уже потом начнет подниматься?

11. В котельной перестали топить, вода в отопительной батарее, стоявшей в холодном коридоре, вымерзла. Слесарь паяльной лампой отогрел батарею, и из нее потекла вода. Когда лопнула батарея: при замерзании или при нагревании ее лампой?

12. Объясните явление, описанное в рассказе Э. Шима «Белое, черное»: «. . .Застывающий гипс вдруг сам по себе начинает разогреваться. . . и очень приятно, особенно зимою, положить закоченевшие руки на сахарно-белую, чуть влажную отливку, полную внутренней ласковой теплоты».

13. Зубные врачи не рекомендуют есть очень горячую пищу. Почему?

14. Чтобы вывернуть старый заржавленный винт, его нагревают паяльником. Когда винт остынет, он легко вывинчивается. Как объяснить это явление?

15. При склепке толстых листов железа в отверстия листов вставляют раскаленные докрасна заклепки и концы их расклепывают ударами молотка. Почему берут раскаленные заклепки?

16. Как изменяется внутренний диаметр однородного металлического кольца при его нагревании?

17. Если вы окунете кусочек хлеба в горячий чай, то рискнете ли, не подув на него, отправить себе в рот? А если окунуть кусок сахару, нужно ли на него дуть прежде, чем взять в рот? Объясните парадокс.

18. Почему, когда пишут мелом на доске, то частички его остаются на ней?

19. Каково происхождение узоров на поверхности оцинкованного железа?

20. Почему пруды замерзают раньше рек?

21. Чугун плавится при более высокой или более низкой температуре, чем железо? Почему?

Как вы думаете

1. Существует ли в молекулярной физике однозначная связь между структурой и функцией?
2. Каковы черты сходства и различия между кристаллическими и аморфными телами?
3. Является ли движение частиц в твердом теле необходимым или случайным?
4. Каковы особенности теплового движения частиц в твердом теле по сравнению с жидкостью и газом?
5. Имеют ли критерии различия между кристаллическими и аморфными телами абсолютный характер?
6. Почему в физическом исследовании свойств твердого тела необходимо применение метода идеализации?
7. Каково объективное содержание понятия «фазовый переход»?
8. Какова идеализированная модель кристалла?
9. Чем определяется смысл используемого нами понятия «эвтектическая точка» - теорией или экспериментом?
10. В чем заключаются количественная и качественная стороны такой физической величины, как теплоемкость?
11. Чем определяется смысл понятия «температура Дебая» - теорией или экспериментом?
12. Является ли утверждение «германий - кристалл» абсолютной истиной?
13. Зависит ли степень аморфности твердого тела от системы отсчета?
14. От каких свойств твердого тела можно абстрагироваться при исследовании его теплоемкости?
15. Может ли вещество, являющееся в одной системе отсчета кристаллом, превратиться в другой системе в аморфное тело? Зависит ли реальный физический факт от того, в какой системе отсчета он рассматривается?

ПРОВЕРЬ СЕБЯ!

1. Чем ниже температура, тем
   a) хуже скользят коньки по льду, особенно при медленном движении;
   b) хуже скользят коньки по льду, особенно при движении;
   c) лучше скользят коньки по льду, особенно при быстром (медленном) движении.
2. Горячая вода, выставленная в мороз на улицу, замерзает
   a) быстрее, чем холодная;
   b) медленнее, чем холодная;
   c) с такой же скоростью, как и холодная.
3. При нагревании железного листа с дырочкой размеры дырочки
   a) уменьшаются вследствие теплового расширения железа;
   b) увеличиваются вследствие теплового расширения железа;
   c) могут как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от размеров дырочки.
4. Достичь того, чтобы отверстие в твердом теле закрылось,
   a) можно нагреванием тела;
   b) можно охлаждением тела;
   c) нельзя никаким изменением температуры тела.
5. Гвоздь не плавится в пламени свечи, так как
   a) температура пламени меньше температуры плавления железа;
   b) пламя недостаточно велико - не окружает гвоздь со всех сторон;
   c) одновременно с получением тепла от пламени гвоздь теряет тепло путем излучения.
6. Стальные конструкции при пожаре рушатся,
   a) потому что сталь плавится в огне пожара;
   b) под действием собственной тяжести, потому что при высокой температуре теряют значительную часть своей прочности;
   c) сталь горит в огне пожара, и целостность стальных конструкций нарушается.
7. На бруске льда висят два одинаковых груза, один на медной, другой на капроновой нитях равного диаметра. При этом
   a) медная нить перерезает лед, а капроновая нет;
   b) капроновая нить перерезает лед, а медная нет;
   c) обе нити перерезают лед.

Лабораторная работа №18

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ТЕЛ

Цель работы: определение температур и кривых плавления кристаллических и аморфных тел.

Приборы и принадлежности: тигельная печь; два фарфоровых тигля; термометр; лупа; секундомер; исследуемое вещество.

Описание экспериментальной установки

Если наблюдать процесс отвердевания расплавленных тел, изменяя их температуру через определенные промежутки времени, то температурные кривые для аморфных и кристаллических тел должны быть различны. Такие диаграммы обычно строят в прямоугольной системе координат, откладывая по оси ординат температуру, а по оси абсцисс – время. Для аморфных тел кривая охлаждения идет плавно, без резких переходов, на кривой охлаждения кристаллических тел наблюдается резкий переход к горизонтальной части, т.е. температурная остановка в том месте, которое отвечает точке кристаллизации, или точке плавления тела. Процессы кристаллизации тел могут значительной осложняться явлением полиморфизма, который встречается очень часто. Полиморфные превращения происходят, подобно кристаллизации, также при постоянной температуре (так называемая температура полиморфного превращения) и сопровождаются выделением или поглощением теплоты: скрытой или удельной теплоты полиморфного превращения. Отсюда следует, что при наличии нескольких полиморфных превращений тела на кривых кристаллизации будет наблюдаться несколько температурных остановок, каждая из которых отвечает температуре соответствующих превращений.

При определении удельной теплоты плавления и полиморфных превращений применяются различные методы. Один из них, а именно метод непосредственного определения температур, предлагается в данной работе для исследования свойств кристаллических и аморфных тел.

Прибор для исследования процессов плавления кристаллических и аморфных тел (рис. 18) состоит из электрического нагревателя В, внутри его находится фарфоровый тигель С. Внутри тигель С заполняется исследуемым веществом, на штативе укрепляется точный термометр Т, показания которого отсчитываются при помощи лупы. Второй вспомогательный термометр, укрепленный несколько выше, служит для определения поправки термометра Т на неравномерное нагревание столбика ртути. Неравномерное нагревание столбика ртути может давать ошибки в несколько сотых долей градуса. Оно вызывается тем, что при измерении температуры обыкновенно только часть термометра находится в пространстве, температура которого определяется, а остальная часть столбика ртути находится при иной температуре; очень часто это является необходимым для производства отсчета. В этих случаях принято определять вычислением поправку. Для соответствующей поправки Δt пользуются формулой:

$$\Delta t = (\beta - \alpha)(t - t_1)z,$$

где β, α — коэффициенты расширения ртути и стекла; t — измеряемая температура; t_1 — средняя температура выступающей части столбика ртути; z — его длина, выраженная в градусах термометрической шкалы. При вычислении этой поправки трудно бывает установить среднюю температуру выступающей части столбика ртути, очень часто ее определяют, помещая около середины выступающей части столбика ртути второй (вспомогательный) термометр. Величина коэффициента расширения α для различных видов стекла различна.

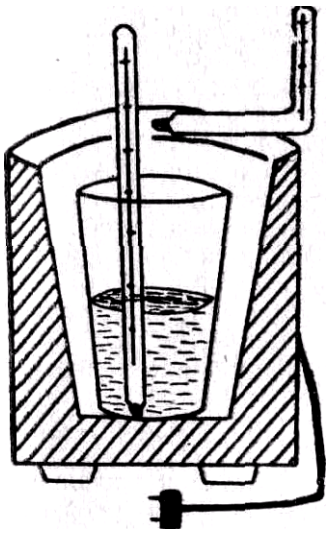


Рис. 18.

Изучение процессов плавления аморфных тел можно производить с воском или парафином. Для изучения кривых отвердевания кристаллических тел можно пользоваться гипосульфитом. Его температура плавления около 46 °С. Вещества эти лежат в отдельных тиглях, которые последовательно помещают в нагреватель При наблюдении каждое из этих веществ расплавляется в тиглях, затем устанавливают термометр так, чтобы весь резервуар со ртутью находился внутри расплавленного вещества, и нагревают последнее на несколько градусов выше точки плавления, отсчитывая его температуру по термометру Т. Вспомогательный термометр при этом устанавливается на такой высоте, чтобы его шарик находился приблизительно посередине столбика термометра Т, выступающего над уровнем жидкости в тигле С. Затем выключают ток в нагревателе, вынимают тигель на подставку и отсчитывают показания термометра через каждую минуту. Показания нужно снимать до тех пор, пока t не снизится на 2—3 °С ниже температуры затвердевания. При непосредственных отсчетах термометра следует вводить поправку на выступающий столбик, для чего необходимо отсчитывать показания по вспомогательному термометру. Данные записывать в таблицу. Все результаты необходимо изобразить графически. Для этого вычерчивают кривую охлаждения воска и гипосульфита. По кривой гипосульфита находят температуру кристаллизации, принимая во внимание поправку на выставляющийся столбик ртути.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Поместить в нагреватель тигель с исследуемым веществом.
2. Расплавить исследуемое вещество.
3. Установить термометр так, чтобы весь резервуар с ртутью находился внутри расплавленного вещества.
4. Нагреть вещество на несколько градусов выше точки плавления.
5. Отсчитать его температуру по термометру Т.
6. Установить вспомогательный термометр на такой высоте, чтобы его шарик приходился приблизительно посередине столбика термометра Т, выступающего над уровнем жидкости в тигле С.

7. Выключить ток в нагревателе, вынуть тигель на подставку.
8. Отсчитывать показания термометра через каждую минуту.
9. Отсчитывать одновременно показания по вспомогательному термометру.
10. Снимать показания до тех пор, пока температура не снизится на 2-3 ^{0}С ниже температуры затвердения.
11. Ввести поправку на выступающий столбик при непосредственных отсчётах термометра.
12. Повторить измерения п.п. 1-11 для каждого из исследуемых веществ.
13. Результаты измерений занести в таблицы.
14. Все результаты изобразить графически.
15. По кривой кристаллизации найти температуру кристаллизации исследуемого кристаллического вещества.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы: определение среднего коэффициента линейного расширения изотропных веществ.

Приборы и материалы: ЛАТР, приборная труба с нагревателем, индикатор удлинения, металлические стержни.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Прибор для определения коэффициента линейного расширения состоит из длинной металлической трубки L, внутри которой намотана спираль, в которую вставляются исследуемые стержни (медь, железо, стекло). В свободный конец стержня упирается рычажок индикатора удлинения И с ценой деления с = 0, 01 мм. В середине трубы L просверлено отверстие, в которое вставлен термометр Т (рис. 19).

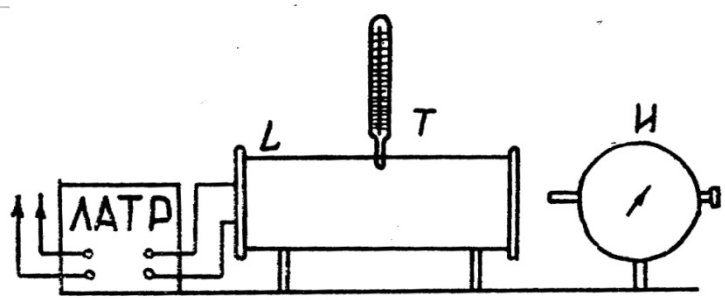


Рис. 19.

По индикатору измеряется удлинение трубы $\Delta l = n_2 - n_1$. Тогда линейное удлинение $\Delta L = L_2 - L_1 = c\Delta l$. Коэффициент линейного расширения исследуемого вещества рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_1(t_2 - t_1)} = \frac{c(n_2 - n_1)}{L_1(t_2 - t_1)}$$

Измерения и их обработка

1. Измерить масштабной линейкой расстояние L_1 между концами стержня (начальную длину стержня)
2. Зафиксировать начальную температуру стержня (взяв комнатную)
3. Вставить стержень в прибор.
4. Включить ЛАТР в сеть (следить, чтобы напряжение, подаваемое на прибор, не превышало 55 В)
5. В момент, когда температура перестанет повышаться, определить с помощью индикатора линейное удлинение $\Delta L = L_2 - L_1$.
6. Записать установившееся значение температуры.
7. Вычислить коэффициент α.
8. Проделать аналогичные измерения с двумя другими стержнями.
9. Провести полную математическую обработку полученных результатов.

Лабораторная работа №20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное определение теплоемкости металлов.

Приборы и принадлежности: электропечь; набор образцов; секундомер; термопара; гальванометр; реостат; ключ; весы технические с разновесами.

Описание экспериментальной установки

Всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причем скорость охлаждения зависит от величины теплоемкости тела. Если взять два металлических стержня определенной формы, то, сравнивая кривые охлаждения (температуры в функции времени) этих образцов, один из которых служит эталоном (его теплоемкость и скорость охлаждения должны быть известны), можно определить теплоемкость другого, определив скорость его охлаждения.

Количество тепла, теряемого элементарным объемом dV металла за время dt:

$$dq = c\rho \frac{dT}{dt} dVdt \qquad (1)$$

где c — теплоемкость металла, ρ — плотность его, T — температура образца (принимается одинаковой во всех точках образца, так как линейные размеры тела малы, а теплопроводность металла велика). Величину dq можно подсчитать, кроме того, по закону Ньютона:

$$dq = \alpha\,(T - T_0)dSdt \qquad (2)$$

где dS — элемент поверхности, T_0 — температура окружающей среды, α — коэффициент теплоотдачи. Приравнивая выражения (2) и (3), получим:

$$c\rho\frac{dT}{dt}dV = \alpha(T - T_0)dS$$

Количество тепла, которое теряет весь объем образца,

$$Q = \int c\rho\frac{dT}{dt}dV = \int \alpha(T - T_0)dS$$

Полагая, что $\frac{dT}{dt}$, c и ρ не зависят от координат точек объема, а α, T и T_0 не зависят от координат точек поверхности образца, можно написать:

$$c\rho\frac{dT}{dtV} = \alpha(T - T_0)S \qquad \textbf{(3)}$$

где V – объем всего образца, S – поверхность всего образца.

Напишем соотношение (3) для двух одинаковых образцов. В этом случае $S_1 = S_2$, $T_1 = T_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$. Делением одного выражения на другое получим:

$$c_1 = c_2\frac{m_2}{m_1}\frac{\left(\frac{dT}{dt}\right)_2}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_1} \qquad (4)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса первого образца, $m_2 = \rho_2 V_2$ – масса второго образца.

В данной работе определение теплоемкости металлов проводится на установке рис. 20.

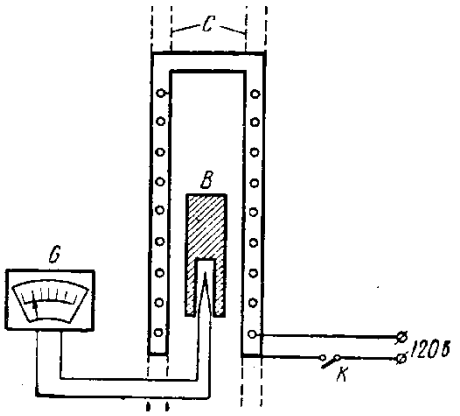


Рис. 20.

Электропечь А смонтирована на двух направляющих стержнях С, по которым она может перемещаться вверх и вниз. Образец В представляет собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 5 мм с высверленным каналом с одного конца. Этим каналом образец помещают на фарфоровую трубку, через которую пропущены проволоки термопары. Концы термопары подведены к гальванометру G. Температура образца отсчитывается прямо по шкале гальванометра, для чего последний снабжен специальным графиком перевода его показаний в значения температуры спая термопары.

Измерения и их обработка

1. Собрать установку (рис. 20).
2. Печь опустить по направляющим стержням вниз настолько, чтобы образец полностью оказался внутри нее.
3. Включить источник тока, замкнув ключ К.
4. Нагрев образец до температуры 500–600 °С, печь быстро поднять вверх и закрепить.
5. Нагретый образец охладить в неподвижном воздухе.
6. Через каждые 10 сек производить запись температуры Т образца по показаниям гальванометра G. Время t отсчитывать по секундомеру.
7. После охлаждения образца до температуры ниже 100° опыт повторить еще раз.
8. Повторить измерения п.п. 2-7 для всех образцов.
9. Построить график зависимости температуры Т образца от времени t: Т = f(t), откладывая по оси абсцисс время t, а по оси ординат температуру Т.
10. Для каждого образца снимают две кривые охлаждения и строят график для меди, железа, алюминия по средним значениям.
11. Графическим методом переводят кривые Т = f(t) всех образцов в кривые $\frac{dT}{dt} = \varphi(T)$, для чего кривые Т = f(t) разбивают на одинаковые близкие друг к другу участки вертикальными линиями, перпендикулярными оси абсцисс. Разности значений ординат кривых в точках пересечения их с вертикальными линиями будут представлять собой разности температур ($T_1 - T_2$), ($T_2 - T_3$) и т. д. для интервалов времени Δt_1, Δt_2, Δt_3 и т. д., на которые разбита ось абсцисс вертикальными линиями $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 1$.
    Отношения

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_1 = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t_1}, \qquad \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_2 = \frac{T_2 - T_3}{\Delta t_2}, \qquad \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_3 = \frac{T_3 - T_4}{\Delta t_3} \qquad (5)$$

и т. д. характеризуют скорость охлаждения в данной точке кривой и, следовательно, скорость охлаждения, соответствующую некоторой температуре.

12. Числовые значения, полученные по формуле (5), вносят в таблицу записи результатов и строят график зависимости $\frac{dT}{dt} = \varphi(T)$ для образцов Cu, Fe, A1, откладывая по оси абсцисс значения температуры Т, по оси ординат значения $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ первого графика.

13. Определяют теплоемкость c_1 алюминия, а потом железа c_3 для температур 100, 200, 300, 400, 500 °С. Для этого в формулу (4) подставляют значения $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ для каждого образца при этих температурах. За эталонный образец принимают медный.
14. Зависимость теплоемкости меди от температуры дана в таблице на установке.
15. Из таблицы берут значения теплоемкости меди (c_2) для температуры 100, 200, 300, 400, 500, 600 °С и подставляют в формулу (4) соответствующие значения $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ для меди, которые также берут из графика $\frac{dT}{dt} = \varphi(T)$ для медного образца.
16. Массы m_1, m_2, m_3 образцов определяют взвешиванием.
17. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Это интересно

РОБЕРТ ГУК [15, 17]

Роберт Гук (1635–1703) – один из выдающихся современников Ньютона. Круг его интересов был настолько широк, что это мешало ему сосредоточиться на какой-либо одной области и добиваться там решающих результатов. Подчас Гук высказывал по-настоящему гениальные идеи, нащупывал важнейшие проблемы и открытия, но не доводил своих работ до конца и не дал своего имени ни одному из открытий, за исключением закона Гука, в котором через столетие к его имени было добавлено имя Юнга.

Роберт Гук родился слабым, болезненным, жил без отца. Никто не ожидал, что он доживет до зрелых лет. Детство и юность провел в одиночестве, конструируя всевозможные механические приспособления. Он увлекался математической магией, солнечными часами, водяными мельницами. Дом отца – священника на острове Уайт – долго был его единственным пристанищем: из-за слабого здоровья и постоянных головных болей он не смог посещать школу. Затем ему повезло – первым его воспитателем в Лондоне, в знаменитой Вестминстерской школе стал доктор Бастби, розги которого, выведшие в люди многих великих людей, вошли в фольклор британских университетов.

Всякие занятия перепробовал Гук – мучимый жестокой аллергией на масляные краски, учился у лондонского живописца, имея неразвитый слух, пел в церковном хоре. В Оксфорде он познакомился с Джоном Уилкинсом, Уильямом Нетти, Кристофером Реном, Робертом Бойлем. Роберт Бойль, построивший в Оксфорде большую лабораторию, пригласил его к себе ассистентом. В этой лаборатории Гук вместе с Бойлем занимался усовершенствованием воздушного насоса, изобретенного магдебургским бургомистром Отто фон Герике. Бойль был чрезвычайно строг к себе и доброжелателен к другим. А Гук уже тогда обнаружил худшие стороны своего характера, за глаза обвиняя Бойля в том, что он присваивает многие усовершенствования воздушного насоса, принадлежащие ему, Гуку.

Гук увлекался всем, чем угодно, даже летающими машинами, действующими мускульной силой. Когда он убедился, что человеческие мускулы слишком слабы, чтобы поднять в воздух сколько-нибудь существенный вес, он стал создавать искусственные мускулы. Заинтересовавшись усовершенствованием часов, Гук изобрел часы со спиральной пружиной, с балансиром и анкерным механизмом, то есть механические часы сегодняшнего дня. Знакомые Гука настаивали на патентовании; условия патента Гука не удовлетворили, и его изобретение никак не было документально подтверждено. Впоследствии, когда в 1674 году вышла книга «Horologium Oscillatorum» Гюйгенса с описанием часов со спиральной пружиной, Гук утверждал, что секретарь Королевского общества Ольденбург, знавший устройство механизма, сообщил о нем Гюйгенсу. Это и стало началом смертельной вражды между Гуком и Ольденбургом.

Гук был человеком бешеной умственной активности. Он мог свободно рассуждать на любую тему. У него в то же время были и золотые руки, он был способен все сделать сам, мог самостоятельно провести любой эксперимент. Опыты, которые не получались у самых искусных экспериментаторов, у него проходили с блеском. У него все работало, все выходило так, как должно было быть.

Именно этим он снискал к себе глубочайшее уважение членов будущего Лондонского Королевского общества, и именно этим объясняется их почетное предложение – стать единственным платным сотрудником общества, куратором экспериментов. За казенную квартиру в Грешем-колледже и тридцать фунтов в год он должен был еженедельно показывать в обществе несколько новых экспериментов. Его обязанности были сформулированы так: «Представлять обществу каждый раз, когда оно заседает, три или четыре значительных эксперимента, не ожидая компенсации до тех пор, пока общество само не сочтет необходимым вознаградить его за труды». (Не забудем, что Гук по социальной табели о рангах того времени был единственным членом Королевского общества, которого нельзя было считать «джентльменом».) В первое время Роберт Гук – куратор экспериментов – делал более сотни опытов ежегодно. Более того, им были выработаны основные принципы общества. Вот что осталось с тех времен в его рукописных заметках:

«Целью и назначением Королевского общества являются:

- дальнейшее познание экспериментальным путем явлений природы, полезных ремесел, производства, практической механики, двигателей и изобретений (всего того, что не имеет отношения к богословию, метафизике, морали, политике, грамматике, риторике или логике);
- попытка воскресить полезные ремесла и изобретения, преданные ныне забвению;
- исследование всех естественных, математических и механических систем, теорий, принципов, гипотез, оснований, явлений и экспериментов, упомянутых или введенных в практику любым значительным автором древности или современности, с целью создания законченной и обоснованной философской системы, объясняющей все явления природы и искусства, и составления обоснованного представления о причинах вещей...»

Гук изучал влияние погоды на показания барометра, изобрел проекционный фонарь, подводный колокол, метод телеграфии, зуборезный станочек для часов. Он открыл

вращение Марса и первым обратил внимание на двойные звезды. Гуку принадлежит идея использовать в качестве нуля температуры точку замерзания воды, которая, как он выяснил, всегда отличается завидным постоянством. Он проверял все сомнительные эксперименты, предлагавшиеся Королевскому обществу, он обеспечил сбор многочисленных фактов и систематизацию явлений, которые потом смогли стать материалом для строительства новой науки. В Королевском обществе он поставил более четырехсот опытов. И кроме всего прочего, коллекционировал для общества всевозможные редкости и курьезы, поражавшие его воображение. Он собирал их, где только мог, покупал, выменивал, получал в дар, уговаривал подарить или завещать обществу. В музей Королевского общества были, например, доставлены: живородящий страус, растение, выросшее в желудке дрозда, кожа смуглого мавра с седой бородой и волосами; «но более всего достойны описания часы, приводимые в движение магнитом и предназначенные для определения на море расстояний до континентов по долготе».

После знаменитого Большого лондонского пожара правительство обратилось в Королевское общество с просьбой разработать план переустройства Лондона, и естественно, в первую очередь эта нелегкая и почетная задача встала перед известным архитектором Кристофером Реном и Гуком. Гук был молод, он с необычайным энтузиазмом и энергией взялся за дело. Будучи назначен городским землемером и инспектором строительных работ, он разработал несколько проектов перестройки Лондона, проложив сквозь пепелища и кладбища каминных труб прямые магистрали. Он создал на бумаге Лондон будущего. Этот город был, конечно, невозможен. Широкие проспекты, намеченные им, неизбежно сносили чьи-то дома, вторгались в частные владения, ущемляли чьи-то интересы. К Гуку стала обращаться масса людей, предлагавших взятки. Они были не против магистралей, но хотели бы, чтобы эти магистрали пролегли по другим местам. Гук с негодованием выпроваживал их, но на их место приходили другие визитеры. Гук стал одним из главных архитекторов нового Лондона. Он построил больницу под названием «Бедлам» и королевский лекарский колледж. Он хвастал, что заработал на этом кучу денег, и показывал в доказательство большой кованый сундук.

Гук был весьма общительным человеком, любил проводить время с друзьями в веселых тавернах (только в его дневниках насчитывается более двухсот их наименований), основывать тайные общества и секретные клубы. Ричард Уоллер предпослал посмертному сборнику научных работ Гука введение, в котором он описал его характер, привычки и внешность. Вот что он пишет:

«Что касается его личности, то он отнюдь не был изгоем, хотя был сильно горбат. Я слышал от него и других, что когда-то он был строен – примерно до шестнадцати лет, но с тех пор он стал развиваться неправильно из-за излишнего увлечения гимнастическими упражнениями на турнике... Он остался и низкорослым, хотя, судя по ногам, он должен был бы быть выше среднего роста. Он был активным, неустанным гением, почти до самых своих последних дней спал очень мало, редко ложился спать раньше трех-четырех часов утра, притом редко спал в постели; чаще всего он продолжал свои научные изыскания всю ночь, компенсируя это лишь кратким дневным сном. Характер его был меланхоличным, недоверчивым и ревнивым, что с годами становилось все заметней».

Интеллект невиданной мощи. Благородный характер и романтические порывы, сочетающиеся с подозрительностью, мелочностью, цинизмом, ревностью, обидчивостью. Головные боли, изнуряющие болезни, тяжелый непрерывный труд. Кто-то сказал, что он жил умирая. Неустроенная семейная жизнь, запутанные любовные истории, всегда заканчивающиеся плачевно, угрюмый темперамент, злой язык, нескончаемые обвинения окружающих в том, что они украли у него плоды его труда. Гук был чрезвычайно ревнив, он считал, что все идеи, которые появляются на горизонте, все эксперименты, выполненные кем-то, были ранее предложены и сделаны им. При этом он часто бывал прав, поскольку проделал собственными руками, как никто, много опытов. Обладая острой наблюдательностью, он обнаружил десятки новых явлений и закономерностей. Не имея, однако, времени остановиться на каждом из них, он шел все дальше и дальше, к новым явлениям и новым законам; те, кто шел за ним, всегда рисковали получить обвинение в плагиате. То, что другие шли по его стопам и, как ему казалось, присваивали себе открытое им, повергало Гука в неисчислимые страдания. Их слава больно ранила его.

И, несмотря на это, – большое уважение, авторитет и, может быть, даже любовь, которыми он пользовался в обществе. Научную работу он рассматривал как свое высшее божественное предназначение. В написанном Гуком продолжении «Новой Атлантиды» Бэкона есть строки о его научном идеале. Он хотел бы сделать как можно больше новых научных открытий с целью их немедленного практического применения. Даже занятия Гука принципом тяготения имели четкую практическую направленность: с его помощью он хотел решить проблему определения точной долготы на море. Но бешеная нагрузка Гука в Королевском обществе, неимоверное количество экспериментов, которые приходилось ему подготавливать, не могли позволить ему сосредоточиться на чем-нибудь одном. Он, как бабочка, вынужденно порхал от цветка к цветку, наслаждаясь все новыми и новыми научными открытиями. Его называли «донжуаном от науки».

Главный труд, который он оставил – «Микрография», – увидел свет в 1665 году. «Микрография» Гука – крупнейшее событие в истории физической оптики. Гук первым изучил цвета тонких пленок и смог объяснить явления, происходящие в них, с точки зрения своей волновой теории. Он смог объяснить и взаимодействие цветовых волн, он переоткрыл, вслед за Гримальди, дифракцию, исследуя искривление света при его прохождении рядом с лезвием бритвы. Построенные им самим микроскопы помогли ему создать приводимые в его «Микрографии» прекрасные иллюстрации строения насекомых и растений. Клеточное строение растений описано им впервые. Его совместная с Гюйгенсом колебательная теория света, по существу – волновая теория, сильно опережала свое время. Должно было пройти по меньшей мере два столетия, чтобы она была оценена по достоинству.

В 1678 году вышла книга «О восстанавливающей силе...», в которую вошли рассуждения Гука, возникшие под впечатлением его многочисленных бесед с известным часовщиком Томасом Тампионом. Здесь дана была, наконец, расшифровка той анаграммы, которую уже в течение трех лет пытались разгадать коллеги Гука по Королевскому обществу. В 1675 году Гук опубликовал странную работу под названием: «Десяток изобретений, которые я намереваюсь опубликовать». Одним из десяти

«изобретений» была «Истинная теория упругости и жесткости». Однако под заголовком было лишь несколько букв, которые можно было бы рассматривать только как заявку на приоритет в том случае, если бы за три года кто-нибудь пришел бы к тем же, что и Гук, выводам. Но анаграмма оказалась ненужной, никто за три года не пришел к тем выводам, и он мог раскрыть свою тайну. Расшифровка анаграммы дала следующий результат: «Каково удлинение, такова и сила». Это как раз то, что вошло теперь в инженерную и строительную практику под названием «закона Гука».

И все же, несмотря на все эти замечательные заслуги, которые сделали бы честь любому ученому, и даже многим ученым, навсегда внесли бы их имена в пантеон самых великих, Гука практически забыли. От Гука остался лишь закон Гука. Большинство бумаг Гука безвозвратно исчезло. Лондон перестроился таким образом, что следов проектировки Гука в его улицах и площадях не осталось. Бедлам, спроектированный им, срыли. Инструменты, которые он своими руками построил для Королевского общества, были или украдены или развалились со временем – ничего не осталось. Не сохранилось ни одного портрета Гука, хотя точно известно, что они существовали. Потеряна его могила, неизвестно даже кладбище, где он похоронен.

Лист обновления/актуализации

Программа обновлена.

Программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры бухгалтерского учета и налогообложения от «31» августа 2020 г., протокол № 1.

Программа одобрена на заседании Совета физико-технического факультета от «31» августа 2020 г., протокол № 1.

Сведения о преподавателе (ППС)

Разработчик:

Елканова Т.М., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и астрономии Северо-Осетинского государственного университета.

Программа одобрена на заседании кафедры физики и астрономии

от _____г., протокол № ___