

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Е.А. Кортаев, В.С. Еремин, В.И. Мочалова

**ОБЩАЯ ФИЗИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ**

*Учебно-методическое пособие
для студентов II курса физико-математического факультета*

ВОРОНЕЖ
Воронежский государственный педагогический университет
2011

УДК 533.7(07)
ББК В22
К66

Издано по решению
учебно-методического совета ВГПУ.
Протокол № 7 от 12.05.2011

Рецензент:

доктор физико-математических наук, профессор *С.Н. Дрождин*

Ответственный редактор:

доктор физико-математических наук, профессор *В.А. Хоник*

Коротаев Е.А

К66

Общая физика. Молекулярная физика и основы термодинамики: учебно-методическое пособие для студентов II курса физико-математического факультета / Е.А. Коротаев, В.С. Еремин, В.И. Мочалова. – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2011. – 64 с.

Издание представляет собой методические указания к л/р по дисциплине «Общая физика», раздел «Молекулярная физика и основы термодинамики». В пособии приводится описание установок и приборов, порядок выполнения, теоретическое обоснование, контрольные вопросы к конкретным лабораторным работам. Также показано, какими компетенциями должен обладать студент в результате выполнения лабораторных работ.

Предназначено для студентов II курса физико-математического факультета.

УДК 533.7(07)
ББК В22

© Коротаев Е.А., Еремин В.С., Мочалова В.И., 2011
© Воронежский государственный педагогический университет,
редакционно-издательская обработка, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей проведения лабораторного практикума по физике является формирование у Вас, глубокоуважаемый студент, ряда специальных профессиональных компетенций, а именно:

- *демонстрировать, применять, критически оценивать и пополнять физические знания для решения профессиональных задач;*
- *понимать значение экспериментального метода физической науки и владеть навыками постановки учебного эксперимента;*
- *понимать и излагать получаемую информацию и представлять результаты физических исследований.*

Для формирования заявленных компетенций в ходе каждой работы Вам придется решать ряд задач, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления;
- объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;
- характеризовать, давать описание объекта исследования (образец, устройство, поток частиц, излучение) и выделять его особенности;
- объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении каждой конкретной работы;
- работать с приборами, выбирать нужный диапазон измерений (определять цену деления шкалы);
- проводить измерения, соблюдая заданные условия, грамотно и аккуратно записывать результаты в заранее составленные таблицы;
- вычислять и учитывать приборную и случайную погрешности прямых и косвенных измерений;
- представлять результаты эксперимента в виде сводных таблиц и графиков; определять параметры исследуемых функциональных зависимостей;
- анализировать полученные результаты, делать обоснованные выводы, составлять отчет по работе.

Все эти умения можно приобрести только в результате продолжительной целенаправленной самостоятельной работы и вдумчивом отношении к делу. Особенность занятий лабораторного практикума состоит в том, что они (в отличие от других учебных занятий) с первых шагов требуют Вашей самостоятельности, которая постепенно должна стать практически полной, при этом так работать нужно не только в лаборатории при сборке установки и проведении измерений, но и дома сначала при подготовке к измерениям, затем при графической, математической и литературной обработке результатов, а также при составлении отчета.

По цели, объему и содержанию лабораторные работы по физике могут резко различаться между собой. Однако все они содержат одинаковые последовательности общих по форме конкретных этапов. Более того, сравнительный анализ процессов выполнения учебной лабораторной работы и проведения на-

учного эксперимента с использованием стандартной методики показывает, что в обоих случаях необходимо преодолевать одни и те же этапы, а именно:

- формулировка актуальности исследования данного физического явления;
- формулировка цели работы;
- постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления;
- анализ физических основ метода, используемого в работе, выяснение его точности и пределов применимости;
- предварительная подготовка к выполнению работы: выяснение последовательности конкретных задач и их формулировка, выделение величин, получаемых прямыми и косвенными измерениями, составление таблиц для записи результатов измерений и их начальной обработки;
- сборка установки, проведение измерений, четкая запись результатов, регистрация характеристик и параметров используемых приборов, условий проведения опыта; прикидочная оценка значения измеряемой величины или характера исследуемой зависимости для устранения грубых ошибок; установление надежности результатов измерений;
- математическая обработка результатов измерений и оценка погрешности определения искомых величин с достаточной степенью достоверности;
- систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков;
- формулировка выводов, литературное оформление результатов опыта – написание отчета по работе.

Первые пять этапов – это Ваша самостоятельная работа до проведения измерений в лаборатории, а три последних – после их окончания. Остальные этапы работы выполняются под непосредственным руководством преподавателя и лаборанта.

Выполняя работы физического практикума, приучайте себя с самого начала выделять самостоятельно в каждой из работ все перечисленные девять этапов. Возможно, что вначале это не всегда будет получаться, какие-то этапы или моменты в них окажутся неочевидными. Обращайтесь с вопросами к преподавателю. Если сделать такой подход к работам для себя обязательным, то он постепенно станет привычным. Тем более, если преподаватель возьмёт на себя обязанность отдельно оценивать означенные этапы при защите Вами работы. А так как для выполнения лабораторных работ по всем дисциплинам нужны практически одни и те же общие умения и навыки, то выполнение и контроль заявленных этапов работы значительно облегчит Вам также выполнение лабораторных работ, по другим дисциплинам.

Выполнение каждого этапа – это определенное действие. Система действий, связанных с осуществлением всех этапов, есть Ваша деятельность при выполнении учебного эксперимента. Овладев такой деятельностью, Вы сможете ее использовать и совершенствовать в ходе других практикумов и затем в условиях производства.

Учитывая важность этой деятельности и для обеспечения верного и сознательного ее усвоения, мы сочли целесообразным наглядно изобразить ее структуру в виде таблицы (табл. 1). В ней приведены не только действия (этапы деятельности), а также результат каждого действия, т.е. цель, на достижение которой оно направлено, и умение – качество личности, которое Вы постепенно должны вырабатывать, выполняя данное действие.

Таблица 1

п./п	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
1	2	3	4	
1.	Определение актуальности исследования данного физического явления	Обобщающие знания о месте и роли исследуемого физического явления в конкретном разделе физики, всей физической науки в целом.	Формулировать системные представления о физических процессах, явлениях.	Системных обобщений, синтеза знаний.
2.	Определение цели эксперимента	Формулировка цели работы	Умение формулировать цель	Выделения частного из общего
3.	постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления;	Обобщающие знания о сущности исследуемого физического явления с поиском способов экспериментальной проверки его сущностных зависимостей	Формулировать сущностные признаки и связи исследуемого физического явления.	Вычленять из всей совокупности знаний об исследуемом физическом явлении сущностные причинно-следственные связи.
4.	Изучение литературы (описания работы)	Сведения о свойствах конкретного объекта и физических основах метода его исследования	Умение обосновать выбор объекта и метода, приводящих к достижению цели	Определения из литературных данных оптимальных способов проведения эксперимента
5.	Подготовка к проведению измерений	Перечень задач работы. Схема установки. Протокол с таблицами для записи результатов измерений	Умение обосновывать последовательность задач, анализировать схему, продумывать и готовить таблицы для записи результатов	Анализа и синтеза экспериментальной работы
6.	Подготовка установки и проведение опыта	Результаты измерений в виде таблицы	Умение работать с приборами, снимать показания, надежно их записывать, выдерживать и фиксировать условия опыта	Работы с измерительными приборами.
7.	Обработка результатов измерения. Оценка погрешности измерения искомых величин	Значения величин, измеренных прямо и косвенно, с указанием погрешности их измерения	Умение обрабатывать результаты и оценивать погрешность измерения	Работы с множеством экспериментальных данных.

1	2	3	4	
8.	Систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков, формулировка выводов. Составление отчета по работе	Сводные обобщающие таблицы, графики, выводы. Отчет по работе	Умение систематизировать и обобщать результаты, представлять их графически, составлять отчет по выполненной работе	Проведения анализа, синтеза и обобщения экспериментальных данных. Сопоставление полученных результатов с заявленными целями работы. Формулировки выводов.

Результат учебного эксперимента – умение студентов проводить эксперимент, т.е. усвоенные Вами знания об эксперименте как методе исследования, о деятельности по его осуществлению и умения, необходимые для его грамотного проведения.

Выполнение лабораторной работы есть определенная последовательность действий:

- подготовка к эксперименту;
- проведение измерений;
- обработка полученных результатов;
- формулировка выводов и написание отчета.

Для грамотного и быстрого их выполнения у каждого из Вас должна сложиться определенная система знаний и умений (ориентировочная основа действия), которая обеспечит правильное и рациональное исполнение действия. Другими словами, всякому действию должны предшествовать обосновывающие его знания. В данном случае это не только описание конкретной лабораторной работы, но и определенные разделы курса, а также знания по физике и математике, полученные Вами в средней школе, и умение пользоваться методическими указаниями по обработке экспериментальных результатов, назначению и устройству современных измерительных приборов.

Поэтому выполнение каждой лабораторной работы по физике необходимо начинать с изучения ее описания, и приведения знаний в систему, а именно: ясно представить себе общую цель данной конкретной лабораторной работы и последовательность задач, решение которых приведет к достижению окончательной цели;

- знать, какое физическое явление изучается в данной работе и какими зависимостями связаны величины его описывающие;
- знать основные особенности объекта исследования (образец, поток частиц, излучение);
- изучить и уметь объяснить физические основы используемых в работе методов измерения искомых величин;
- уметь нарисовать принципиальную схему используемой установки и знать назначение каждого из ее узлов;

- знать последовательность выполнения этапов лабораторной работы;
- иметь общее представление об ожидаемых результатах проводимого эксперимента и суметь выбрать метод, нужный для их математической обработки.

Только такая основательная и систематическая подготовка к каждой работе позволит сознательно выполнять лабораторные работы по физике и целенаправленно вырабатывать у себя необходимые для Вашей будущей деятельности умения и навыки.

Проверять степень своей готовности к выполнению каждой конкретной работы нужно с помощью приводимых ниже обобщенных контрольных вопросов. Они являются общими для всех работ физического практикума. Поэтому полезно (для экономии времени) не только обязательно отвечать на них, готовясь к работе, но и запомнить их как общий принцип подхода к выполнению лабораторных работ вообще.

Обобщенные контрольные вопросы

1. В чём актуальность проведения данной работы?
2. Какова цель работы?
3. Какие сущностные связи характерны для исследуемого физического явления?
4. Каковы возможные экспериментальные пути для проверки сущностных причинно-следственных связей исследуемого физического явления?
5. Что представляет собой объект исследования в данной работе?
6. Какие физические явления положены в основу экспериментального метода определения искомой величины (величин)?
7. Какие допущения сделаны в теории метода?
8. Какая теоретическая зависимость может быть проверена в данном конкретном опыте?
9. Какие конкретные задачи в ходе проведения измерений придется решать для достижения цели?
10. Каково назначение отдельных узлов экспериментальной установки?
11. Какие требования техники безопасности необходимо соблюдать при выполнении данного учебного эксперимента?
12. Какие меры нужно принимать в ходе эксперимента для предупреждения и исключения вредных воздействий на окружающую среду?
13. Какие таблицы нужны в протоколе для записи и начальной обработки результатов измерений?
14. Какие зависимости должны быть построены по полученным данным?
15. Какое уравнение (или система) позволяет найти искомую величину или нужную зависимость на основании опытных данных?
16. Какие постоянные (табличные данные, параметры образца и установки) нужны для определения искомой величины по данным опыта?
17. Как будет определена погрешность прямых измерений?
18. Как придется оценивать погрешность конечного результата?

19. Как можно проверить достоверность полученных экспериментальных результатов?

20. Совпадает ли результат эксперимента с предсказанием теории?

21. Чем вызвано расхождение результатов эксперимента и теории?

22. Можно ли сопоставить результаты эксперимента с литературными данными?

23. Достигнута ли цель работы?

На вопросы 1–9 Вы должны ответить при подготовке к работе и отразить эти ответы в конспекте. На вопросы 10–12 – при непосредственном знакомстве с установкой и в ходе беседы при допуске к работе. На последнюю группу вопросов 13–23 – в ходе опыта, обработки результатов, их систематизации и описании в отчете.

Эта система вопросов очень важна и по другой причине.

Психологами установлено, что процесс приобретения и развития знаний не может протекать и даже начаться без постановки и решения самых разнообразных вопросов. Любой шаг в познании предварен вопросом о том, чем данная информация важна. Именно вопросами выражается первое пробуждение мысли. Овладение умением правильно ставить вопросы не менее важно, чем нахождение способов получения ответов. Поэтому, используя принцип подхода к эксперименту заданный обобщенными вопросами, учитесь ставить и формулировать вопросы, связанные с содержанием конкретной работы.

Требования обобщенного характера к структурным элементам знаний по физике

При самостоятельном изучении всех разделов курса физики Вы имеете дело с такими понятиями, как: явление, величина, метод, закон, теория. Они будут встречаться и при подготовке к лабораторным работам. Для целенаправленного их изучения и изложения полезно знать требования обобщенного характера к этим структурным элементам научных знаний. Они могут исполнять роль планов при построении ответов.

Что нужно знать о каждом конкретном физическом явлении?

- Когда и кем открыто и впервые изучено явление?
- Внешние признаки проявления явления.
- Условия, при которых наблюдается явление.
- Механизм протекания явления (объяснение на основе современных теорий).
- Связь данного явления с другими.
- Количественные характеристики явления:
 - а) величины, характеризующие явление;
 - б) связь между величинами и формулы, выражающие эту связь.
- Примеры использования явления на практике, способы предупреждения его вредного воздействия.
- Определение явления.

Что нужно знать о каждой конкретной физической величине?

- Для чего введена данная величина?
- Общепринятое буквенное обозначение величины.
- Аналитическое выражение этой величины.
- Скалярная или векторная данная физическая величина?
- Единицы физической величины (в СИ обязательно).
- Методы измерения этой физической величины?
- Определение величины.

Что нужно знать о каждой конкретной модели?

- Название модели.
- Вид модели.
- Оригинал (прототип модели).
- Цель введения модели.
- Способ построения (описание) модели.
- Условия замены оригинала моделью.
- Определение модели.

При построении определений физических явлений, величин и моделей следует пользоваться нижеприведенными схемами. Например:

скорость – векторная физическая величина, введенная для количественного оценивания быстроты и направления движения тела, и равная отношению перемещения тела к промежутку времени, за которое произошло это перемещение;

материальная точка – мысленная модель тела, введенная решения задач о его движении и взаимодействии с другими телами и построенная так, что пренебрегают формой, размерами и структурой тела, сохраняя лишь свойства инертности и гравитационности.

Что нужно знать о методе исследования каждого конкретного физического явления или измерения физической величины!?

- Для изучения какого физического явления или измерения какой физической величины применяется метод?
- Прямым или косвенным является этот метод?
- Физические основы метода.
- Области (границы) применимости метода.
- Точность метода. При каких обязательных условиях она достигается?
- Преимущества и недостатки данного метода по сравнению с другими.

Что нужно знать о каждом конкретном приборе?

- Название и марка (тип) прибора.
- Назначение прибора, т.е. для измерения каких физических величин или получения каких сигналов предназначен прибор.
- Одноцелевым или многоцелевым является данный прибор?
- Принцип действия прибора (желательно).
- Основные узлы (части) прибора и их назначение.
- Пределы значений величин или сигналов, допускаемые при работе с прибором.

- Правила обращения (работы) с прибором.
- Погрешности или предел допускаемой погрешности прибора.
- Условное изображение прибора на схемах.

Что нужно знать о законе?

- Кем и когда открыт закон?
- Связь между какими величинами выражает закон?
- Формулировка закона.
- Аналитическое выражение (формула, выражающая закон).
- Опыты, подтверждающие справедливость закона.
- Примеры учета и использования закона.
- Границы применимости данного закона.

Что нужно знать о каждой конкретной теории?

- Кем и когда создана теория?
- Основные положения теории.
- Факты, послужившие основанием для разработки теории.
- Математический аппарат теории (основные уравнения).
- Круг явлений, объясняемых данной теорией (пределы применимости теории).
- *Явления* и свойства материи, предсказанные теорией.

Начальная обработка результатов измерений

Особенность данного этапа обработки в том, что его выполняют сразу после получения экспериментальных данных, т.е. прежде чем разобрана рабочая установка. Это позволяет при необходимости проверить отдельные точки, участки или даже всю зависимость в целом. В ходе такой обработки Вы сможете увидеть, значений каких величин (или постоянных параметров) у Вас еще нет, понять, откуда они могут быть взяты.

Начиная обработку результатов сразу после их получения, т.е. на лабораторном занятии, действуйте в такой последовательности:

- постройте зависимость между величинами по данным опыта, если они непосредственно измерялись;
- сопоставьте вид полученной зависимости с теоретически предполагаемым;
- определите однократно из графика значение нужной величины;
- вычислите конечный результат, используя данные 28 графика.

Иногда оказывается, что величины, зависимость между которыми должна быть построена, непосредственно не измерялись. Тогда начинать обработку придется в иной последовательности, а именно:

- вычислите, используя данные опыта, и запишите в таблицу значения величин, необходимых для построения графика; если экспериментальных данных много, то можно брать пока значения через точку (или даже через две), это сократит объем и ускорит работу;

- постройте зависимость между величинами, используя результаты вычислений;

- сравните вид полученной зависимости с предполагаемым теоретически.

После того, как график построен, обработку продолжайте как и в предыдущем случае.

Требование успевать на занятии не только получить данные, но и построить снятую зависимость должно стать для Вас обязательным правилом.

Построенную зависимость и протокол с таблицами данных предъявите преподавателю для проверки и окончательной подписи. Хорошо, если тут же Вы подумаете о завершении обработки результатов, т.е. представите, что нужно делать для ее окончания и уточните неясные моменты. Обсуждать вопросы обработки, имея график и результаты, уже значительно проще.

Вы уже, вероятно, обратили внимание на то, что осмысливать результаты легче, если они изображены графически. Помимо наглядности графики необходимы для определения значений отдельных величин. График – очень распространенный способ представления экспериментальных результатов. Поэтому стройте их, выполняя общепринятые правила:

- используйте только миллиметровую бумагу и карандаш;
- откладываете по оси абсцисс аргумент (переменную, условно принятую в данном эксперименте за независимую), а по оси ординат – функцию;

- выбирайте масштаб таким, чтобы он легко читался, поэтому одна клетка масштабной сетки должна соответствовать удобному числу – 1, 2, 5, 10 единиц откладываемой величины;

- пишите на осях числовые значения только для крупных единиц масштаба, делайте это за пределами графика (левее оси ординат и ниже оси абсцисс);

- стройте ту область значений, которая была исследована в опыте;

- не давайте начало координат (точка 0, 0), если это не имеет особого физического смысла (результат начального измерения);

- наносите на график все полученные при измерениях значения;

- проводите кривую плавно, по усредненным значениям, избегая изломов и перегибов;

- используйте разные обозначения точек при построении на одном графике нескольких кривых одной и той же зависимости, полученных при разных условиях опыта;

- снабжайте каждый график подрисуночной подписью (внизу листа), содержащей словесное название зависимости, которая на нем представлена, и условий ее получения, т.е. раскрывающей назначение и возможности использования графика;

- пишите обязательно на обратной стороне графика свою фамилию и номер группы.

Окончательная обработка результатов измерений

Общеизвестно, что принципиально невозможно измерить абсолютно точно значение какой-либо физической величины. Поэтому всегда необходимо учитывать полную погрешность опыта и указывать ее в окончательном результате. Полная погрешность опыта складывается из:

- погрешности, связанной с неидеальностью объекта исследования;
- погрешности метода;
- приборных погрешностей;
- ошибок, связанных с проведением данного конкретного опыта – промахи, систематические и случайные ошибки.

Все виды перечисленных погрешностей, кроме случайных, могут быть оценены и практически учтены или устранены еще до начала систематических измерений.

При выполнении работ физического практикума Вы не учитываете ошибок, обусловленных неидеальностью объекта исследования и самим методом. Допускается, что объект идеален, а метод позволяет верно наблюдать и достаточно точно оценивать изменение величины. Конечно, это далеко не всегда так, поэтому в описании работы бывают специально оговорены условия, ограничивающие применение метода. Нужно учиться подходу к учету таких ошибок. Это Вам пригодится в дальнейшей экспериментальной работе.

Оценку погрешности измерения величины для конкретной работы начинайте с расчета и указания в протоколе приборной погрешности. Об этом уже говорилось в разделе "Как проводить измерения". Помните, что погрешность прибора нужно определить обязательно в конце данной работы, пока все приборы перед Вами. Выработайте привычку кончать работу и разбирать установку только после того, как записаны погрешности приборов и выполнена предварительная обработка результатов измерений.

По результатам опыта Вы оцениваете случайные ошибки. Это можно сделать только после проведения достаточно большого числа измерений. Общепринятый метод вычисления случайной погрешности основан на предположении о том, что распределение случайных ошибок в процессе данного опыта соответствует нормальному закону распределения случайной величины.

Таким образом, проведя эксперимент, необходимо вычислять не только значение физической величины, но и погрешность ее измерения, используя особые приемы и методы, разработанные математиками, т.е. выполнять математическую обработку результатов измерений. Это следует делать, пользуясь пособиями, которые Вам рекомендованы.

Вычисление суммарной погрешности измерения величины в каждой работе имеет свои особенности. Однако схемы расчета оказываются общими для всех работ. Они должны быть усвоены, так как Вам предстоит применять их не только при выполнении физического практикума, но и в дальнейшем в работах специальных лабораторий.

Выполнение вышеприведённых рекомендаций и требований к выполнению физического практикума должно приводить к формированию заявленных в начале специальных профессиональных компетенций бакалавра физико-математического образования по специальности «физика». Более подробно с рекомендациями по выполнению физического практикума можно ознакомиться в методическом пособии Ф.П. Кесаманлы, В.М. Коликова^{*}, а также в методическом пособии В.А. Хоник.^{**}

^{*} Кесаманлы Ф.П. Физика. Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов: методическое пособие для студентов / Ф.П. Кесаманлы, В.М. Коликов. – СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2007. – 56 с.

^{**} Хоник В.А. Оценка погрешностей измерений: методические указания / В.А. Хоник. – Воронеж : ВГПУ, 2007. – 24 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ТОЧЕК ЖИДКОСТНОГО ТЕРМОМЕТРА

Цель работы: проверка основных точек термометра и введения поправок к его показаниям.

В работе используются: термометр, емкость со льдом, паровая баня, барометр.

1. Введение

Термометры являются приборами для измерения физической величины, называемой температурой. Температура характеризует состояние термодинамического равновесия макроскопических систем. Для всех частей изолированной системы, находящейся в термодинамическом равновесии, температура одинакова. Если изолированная система не находится в равновесии, то со временем переход энергии (теплопередача) от более нагретых частей системы к менее нагретым приводит к выравниванию температуры во всей системе (это утверждение иногда называют нулевым началом термодинамики). В равновесных условиях температура пропорциональна средней кинетической энергии составляющих тело частицы. Температура определяет: распределение частиц системы по уровням энергии (статистика Больцмана), распределение частиц по скоростям (распределение Максвелла), спектральную плотность излучения (закон излучения Планка), объёмную плотность излучения (закон излучения Стефана-Больцмана) и др.

Абсолютные шкалы температур. В общем случае температура есть производная энергии тела по его энтропии. Определяемая таким образом температура всегда положительна и её называют абсолютной температурой или температурой по термодинамической температурной шкале. За единицу абсолютной температуры в Международной системе единиц (СИ) принят Кельвин (К). Кельвин выбирается таким образом, чтобы тройная точка воды имела температуру $T = 273,16$ К. (1)

В США для измерения абсолютной температуры иногда применяется шкала Рэнкина. Единица измерения в этой шкале – градус Рэнкина ($^{\circ}R$)- равен $5/9$ Кельвина; при таком определении температура тройной точки воды равна $491,69^{\circ}R$.

Производные шкалы от абсолютных шкал. Посредством смещения нуля термодинамической шкалы можно получить новые шкалы температур, не являющиеся абсолютными, но с такой же единицей измерения, как и у исходной абсолютной шкалы.

Шкала Цельсия получается из абсолютной шкалы Кельвина, если за нуль принять температуру замерзания воды при нормальном (101325 Па = 760 мм.рт.ст. = 1 атм) давлении. Единица измерения для этой шкалы – градус Цельсия ($^{\circ}C$)- равна градусу Кельвина. Пересчёт температуры в градусы Цельсия осуществляется по формуле

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273,16$$

В Великобритании и США иногда применяется *шкала Фаренгейта*, которая получается смещением нуля абсолютной шкалы *Рэнкина*. Единица измерения в этой шкале – градус Фаренгейта ($^{\circ}F$) – равна одному градусу *Рэнкина*:

$$T(^{\circ}F) = T(^{\circ}R) - 459,67.$$

Формулы перехода между обеими шкалами имеет вид:

$$T(^{\circ}C) = [T(^{\circ}F) - 32](5/9),$$

$$T(^{\circ}F) = (9/5)T(^{\circ}C) + 32.$$

В некоторых странах сохранилась *шкала Реомюра*, в которой интервал между точкой таяния льда и точкой кипения воды при нормальном давлении разделён на 80 частей. Соответственно, пересчет из шкалы Цельсия в шкалу Реомюра ($^{\circ}R$) производится по формуле: $T(^{\circ}R) = 8/10 T(^{\circ}C)$.

Методы измерения температуры. Температура не может быть измерена непосредственно. Об изменении температуры судят по изменению физических свойств тел (объёма, давления, электросопротивления, эдс, интенсивности излучения и др.), однозначно с ней связанных. Методы измерения температуры для разных диапазонов измеряемых температур различны, зависят от условий измерений и требуемой точности. Эти методы можно разделить на две основные группы: контактные и бесконтактные (так называемая пирометрия). Для контактных методов характерно наличие теплового равновесия (т.е. – одинаковость температур между термометром и средой, температура которой изменяется).

Контактные методы измерения температуры реализуются в жидкостных, манометрических термометрах, термометрах сопротивления, термоэлектрических термометрах (термопары), кварцевых термометрах, термометрах измеряющих температуру по тепловому шуму и др.

В диапазоне криогенных (ниже 120 K) и сверхнизких температур ($T < 1K$) кроме обычных методов применяют специальные, например, – магнитную термометрию (рабочий диапазон – 0,006÷30K, точность до 0,001K) или метод термощумового термометра с преобразователем на эффекте Джозефсона (для измерений $T < 1K$).

Калибровка термометров осуществляется путем сравнения показаний рабочих приборов, в соответствии с Международной практической шкалой температур (МПТШ-90). Используется три физические величины – электрическое сопротивление, электродвижущая сила термопары и излучение чёрного тела, являющиеся функциями температуры, численные значения которой определяются точными значениями реперных точек. Используются тройные точки неона, кислорода, серебра, ртути, воды, точки затвердевания индия, олова, цинка, алюминия, золота и меди при нормальном давлении, а также некоторые другие точки. В интервале между реперными точками температура вычисляется интерполяцией. В интервале температур от $T = -259,34^{\circ}C$ (тройная точка водорода) до $T = 630,74^{\circ}C$ (точка затвердевания сурьмы) используется температурная зависимость электросопротивления проволоки, изготовленной из очень чистой платины. При $630,74^{\circ}C \leq T \leq 1064,43^{\circ}C$ (последняя температура – точка затвердевания золота) для функционирования эталонных термометров используется температурная зависимость эдс термопары платина – платинородий (Pt - 10% Rh) при температуре нулевого спаивания $T = 0^{\circ}C$. При $T > 1064,43^{\circ}C$ температура определяется по интенсивности излучения (энергетической свети-

мости) черного тела на длине волны излучения, соответствующей температуре плавления золота. Интенсивность излучения определяется монохроматическим оптическим пирометром.

В настоящей работе осуществляется проверка основных точек (точка таяния льда и кипения воды при нормальном давлении) жидкостного термометра. Ошибки, возникающие при измерении температуры таким термометром, возникают из-за неполной цилиндричности капилляра, неравномерного и/или нестационарного нагрева верхней части термометра, недостаточной чистоты рабочей жидкости, а также определяются конструктивными особенностями прибора.

Вышеизложенное определяет необходимость проверки основных точек термометра и введения поправок к его показаниям.

2. Описание и порядок проведения эксперимента

Для проверки точки плавления льда специальную ёмкость заполняют мелко колотым льдом и/или снегом, смачивают водой и вставляют термометр до указанной на нем отметки (рис. 1, а). Когда уровень рабочей жидкости в термометре перестаёт изменяться со временем, отсчитывают показания t_1 термометра. Пусть $t_{пл}$ – температура плавления льда ($t = 0^\circ\text{C}$), тогда величина $b \sim t_{пл} - t_1$ называется поправкой термометра для точки t_0 .

Для проверки точки кипения воды термометр вставляют в устройство, схематически изображенное на рис.1.б, после чего включают нагреватель. После закипания воды и установления стационарного распределения температуры (когда уровень рабочей жидкости не зависит от времени) производят отсчет показаний t_2 термометра. Так как температура кипения воды существенно зависит от давления, необходимо с помощью барометра определить атмосферное давление и рассчитать температуру кипения воды $t_{кип}$ по формуле: $t_{кип} (^\circ\text{C}) = 100 + 0,0375 (p - 760)$, где p – показание барометра в мм рт.ст. После этого следует определить поправку для точки кипения: $a = t_{кип} - t_2$.

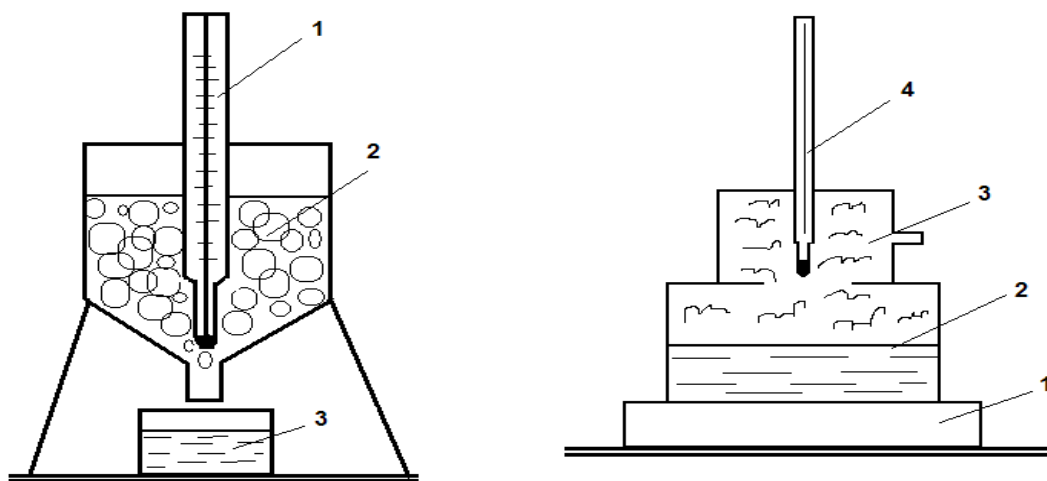


Рис. 1. Способы проверки точки плавления льда (а) и кипения воды (б).

Для части а) рисунка: 1-термометр, 2- лёд или снег, 3- ёмкость для стока воды. Для части б): 1-термометр, 2-кипящая вода, 3- выход водяного пара, 4- нагреватель.

Затем термометр удаляют из паров воды и после его остывания до $t = 40 + 50^\circ\text{C}$ производится повторное погружение в тающий лёд и отсчет показания

t_1 термометра. Если показания термометра для первого и второго эксперимента различаются, то в дальнейших расчетах в качестве t_1 принимается его среднее значение.

С учётом изложенного можно утверждать, что точка кипения воды при нормальном давлении находится на давлении $(100-a)$ шкалы используемого термометра, а точка плавления льда – на делении $(0 - b)$. Тогда число делений на шкале термометра от точки плавления льда до точки кипения воды будет равно $(100 - a) - (0 - b)$, а цена одного деления составит $\Delta t = \frac{100}{100-a-b} \Delta t = \frac{100}{100-a+b}$. Умножая числитель и знаменатель этого соотношения на $[100 + (b - a)]$ и отбрасывая ввиду малости величину $(b - a)^2 (b - a)^2$, получаем для цены деления:

$$\Delta t = 1 + \frac{b-a}{100}$$

Если при измерении температуры какого-либо тела данным термометром последний даёт показания t , то от точки плавления льда до этого показания будет находиться $t + b$ делений. Т.к. цена деления равна Δt (а не 1°C), то истинная температура Q тела будет определяться по формуле

$$Q = (t + b)\Delta t = (t + b)\left(1 + \frac{b-a}{100}\right)(t + b)\Delta t = (t + b)\left(1 + \frac{b-a}{100}\right)$$

Это соотношение называется уравнением термометра и определяет зависимость истинной температуры Q от показаний t данного термометра. Выполнение работы сводится к проведению указанных выше экспериментов и расчётов.

3. Контрольные вопросы.

1. Абсолютная температура. Температура шкалы.
2. Контактные методы измерения температуры.
3. Оптическая пирометрия.
4. Термопары. Физический принцип работы, материалы для термопар.
5. Металлические и полупроводниковые термометры сопротивления.

Критерии выбора рабочих материалов и диапазоны измерений.

6. Термисторы.
7. Измерение температуры по тепловому шуму.

4. Литература.

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш. – Т 1. – М. : Мир, 1992. – 480 с.
2. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности / Л.А. Сена. – М. : Наука, 1977. – 335 с.
3. Физический энциклопедический словарь. – М. : Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: научиться проводить измерения атмосферного давления с помощью ртутного барометра и барометра-анероида.

В работе используются: ртутный барометр, барометр-анероид.

1. Введение.

Собственный вес столба воздуха создает атмосферное давление, факт наличия которого был экспериментально установлен в 1643 г. итальянским физиком Э.Торричелли. С позиции макромеханики давление есть сила, действующая на единицу площади. В рамках молекулярно-кинетической теории давление газа рассматривается как воздействие ударов молекул на стенки сосуда, усредненное по поверхности и времени. Количественно давление p определяется импульсом, передаваемым молекулами в единицу времени единице площади поверхности:

$$p = \frac{1}{3} nm\bar{v}^2 \quad (1)$$

где m - масса молекулы газа, n - концентрация молекул, \bar{v}^2 - среднее значение квадрата скорости молекул.

Если молекула газа движется, например, в поле тяготения земли, то, преодолевая за счет своей кинетической энергии действие сил притяжения, она приобретает в данном поле запас потенциальной энергии. Концентрация молекул (n), находящихся на высоте h от уровня отсчета и, следовательно, обладающих большим запасом потенциальной энергии, будет отличаться от концентрации молекул (n_0), находящихся на уровне отсчета. Связь концентраций выражена законом Больцмана:

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} \quad (2)$$

где k - постоянная Больцмана; T – абсолютная температура газа; mgh – потенциальная энергия газа.

Из закона видно, что, чем больше потенциальная энергия молекул, тем меньше их концентрация. Этот факт хорошо подтверждается убыванием концентрации молекул в поле тяготения Земли. Следует отметить, что если молекулы не подвержены воздействию поля, то их концентрация во всем объеме одинакова.

Так как концентрация газа (n) пропорциональна его давлению ($p = nkT$), то формула связи концентраций молекул легко преобразуется в барометрическую, выражающую давление воздуха (p) от высоты (h) при постоянной температуре T :

$$p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} \quad (3)$$

где p_0 – давление на уровне $h = 0$.

В Международной системе единиц единицей измерения давления является Паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Используются и другие единицы измерения давления:

1 мм рт. ст. (1 Торр) = $1,33 \cdot 10^2$ Па; 1 бар = 10^5 Па;

1 атм (физическая атмосфера) = 760 мм рт. ст. = 101,325 кПа = 1013,25 мбар;

1 атм (техническая атмосфера) = $1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4$ Па.

Приборы, предназначенные для измерений газовых давлений порядка атмосферного и более высоких, называются *манометрами*. Для измерений давлений, не превышающих атмосферное, используются приборы, называемые *вакуумметрами*.

Для измерений атмосферного давления используются барометры. Наиболее часто атмосферное давление измеряется с помощью ртутного барометра и барометра – анероида. Изучению этих приборов и посвящена настоящая работа.

2. Описание и порядок проведения эксперимента.

2.1. Измерение атмосферного давления ртутным барометром.

Используемый в работе стационарный чашечный ртутный барометр применяется в метеорологических станциях и лабораториях. Ртутный барометр, в котором предусмотрена возможность учета всех ошибок измерения, называется нормальным. Точность измерения давления нормальным барометром достигает 0,01 мм рт. ст. В ртутных барометрах обычного типа точность измерения составляет до 0,1 мм рт. ст.

Стационарный чашечный ртутный барометр, используемый в настоящей работе, имеет пределы измерения 810 – 1070 мб (миллибар). Действие прибора основано на уравнивании атмосферным давлением ртутного столба, заключенного в барометрической трубке. Рабочей частью прибора является стеклянная калиброванная трубка, верхний конец которой запаян, а нижний – погружен в чашку с дистиллированной ртутью. Для точного определения высоты ртутного столба в приборе имеется специальная нониусная шкала, проградуированная в миллибарах. Температура барометра определяется встроенным термометром.

Атмосферное давление можно рассчитать по формуле

$$P = \rho g l, \quad (4)$$

где ρ – плотность ртути, g – ускорение силы тяжести, l – длина столба ртути.

Для практического использования этой формулы ее следует преобразовать к виду:

$$P = \rho_0 \frac{\rho}{\rho_0} g_h \frac{g}{g_h} l \quad (5)$$

где ρ_0 – плотность ртути при $T = 0^{\circ}C$, g_h – ускорение свободного падения на уровне моря на широте 45° (так называемое "нормальное ускорение свободного падения"). Отношение ρ / ρ_0 в (5) определяется только температурой ртути T . Величина g/g_h зависит от широты φ места измерения и от его высоты H над уровнем моря. С достаточной степенью точности эти зависимости могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} \frac{\rho}{\rho_0} = 1 - \alpha T \\ \frac{g}{g_h} = (1 - \beta \cos 2\varphi)(1 - \gamma H) \end{cases} \quad (6)$$

где α – коэффициент объемного теплового расширения ртути, β и γ – некоторые постоянные.

Подставляя (6) в (5) и пренебрегая членами высших порядков малости, получаем:

$$P = \rho_0 g_0 l (1 - \alpha T - \beta \cos 2\varphi - \gamma H) \quad (7)$$

Заклученный в скобки сомножитель в правой части (7) представляет собой поправку, которую необходимо учесть для точного расчета P . Эта поправка состоит из трех частей:

- 1) поправки на приведение длины столба ртути к температуре $T = 0^{\circ} \text{C}$ ("температурная поправка" $-\alpha T$);
- 2) поправки на приведение длины столба ртути к широте 45° ($-\beta \cos 2\varphi$);
- 3) поправки на приведение столба ртути к уровню моря ($-\gamma H$).

Поправки 2) и 3) в сумме образуют поправку на приведение к нормальному ускорению свободного падения.

При изменении температуры в результате теплового расширения шкалы барометра меняется ее длина. Связанную с этим ошибку можно учесть, принимая коэффициент теплового расширения в уравнении (7) равным разности между коэффициентом объемного теплового расширения ртути и коэффициентом линейного расширения материала шкалы барометра (латунь). Для рассматриваемого барометра эта разность равна $4,2 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$. Поправка на приведение к нормальному ускорению свободного падения для географического положения г. Воронежа составляет $-6 \cdot 10^{-4}$. Тогда (7) можно переписать в виде:

$$P = P_0 (1 - 4,2 \cdot 10^{-5} T - 6 \cdot 10^{-4}), \quad (8)$$

где P_0 – давление, полученное при отсчете по нониусной шкале барометра, T – температура в градусах Цельсия.

2.2. Порядок выполнения работы.

1. Снять показания встроенного термометра с точностью $0,1^{\circ} \text{C}$.
2. Поднять колодку с нониусом с помощью винта выше уровня ртути и затем медленно опустить ее до совмещения вершины ртутного мениска с горизонтальной плоскостью, образованной срезом нониуса и кольцом, видимым в прорези оправки позади нониуса.
3. Отсчитать десятые доли миллибара по штриху нониуса, совпадающего со штрихом основной шкалы.
4. Отсчитать целые миллибары по ближайшему к нижнему срезу нониуса делению основной шкалы. Указанные отсчеты образуют величину P_0 в соотношении (8).
5. Рассчитать атмосферное давление в миллибарах по формуле (8).
6. Выразить атмосферное давление в паскалях и мм рт. ст.

2.3. Измерение атмосферного давления с помощью барометра-анероида.

В барометре-анероиде (такие барометры также называют деформационными) чувствительным элементом является откаченная тонкостенная коробка, изготовленная из упругого материала. Изменение атмосферного давления вызывает деформацию коробки, что приводит к изменению положения механически связанной с коробкой стрелки. Рядом со стрелкой расположена шкала, проградуированная в мм рт. ст.

Барометры анероиды не относятся к группе прецизионных приборов (значительные погрешности таких барометров связаны главным образом с наличием температурной зависимости упругих свойств материала коробки), однако благодаря простоте и малым габаритам они получили широкое распространение.

Проведение измерений заключается в считывании показаний со шкалы прибора. Полученное значение следует затем перевести в систему СИ и сравнить с величиной, полученной с помощью ртутного барометра.

3. Контрольные вопросы.

1. Давление газов в рамках молекулярно – кинетических представлений. Получить формулу (1).
2. Атмосферное давление. Причины возникновения и методы измерений.
3. Ртутный барометр. Принцип работы и учет погрешностей.
4. Почему в формуле (7) под величиной α следует понимать разность между коэффициентом объемного расширения ртути и коэффициентом линейного расширения материала шкалы.
5. Рассчитать давление, оказываемое на неподвижную стенку нормально падающим на нее молекулярным пучком, состоящим из одинаковых молекул, движущихся с одинаковой скоростью. Как изменится результат, если неподвижную стенку заменить поршнем, движущимся навстречу пучку.

4. Литература.

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш. – Т. 2. – М. : Мир, 1992. – 417 с.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1981. – 400 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ГАЗА

Цель работы: вычисление длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул газа (который составляет 78,2% воздуха) по коэффициенту внутреннего трения (вязкости).

В работе используются: аспиратор, водяной манометр, капилляр.

1. Введение.

Заметные отклонения молекул от прямолинейных траекторий при тепловом движении происходит только при их достаточном сближении. Такое взаимодействие между молекулами называется **столкновением**. Процесс столкновения молекул удобно характеризовать величиной **эффективного диаметра молекулы**. Под ним понимается минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры двух молекул при их столкновении.

Расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями, называется длиной свободного пробега молекулы. В данной работе определяется **средняя длина свободного пробега** молекулы, так как длины свободных пробегов отдельных молекул из-за статистического характера процессов в газах, естественно, должны отличаться.

Молекулярно-кинетическая теория позволила получить формулы, в которых макроскопические параметры газа (давление, объем, температура) связаны с его

микроскопическими параметрами (размеры молекулы, её масса, скорость). Пользуясь этими формулами, можно при помощи легко измеряемых микропараметров (давления, температуры, коэффициента внутреннего трения) получить интересные микропараметры (размеры молекулы, длину ее свободного пробега).

Из молекулярно-кинетической теории вытекает формула, связывающая вязкость со средней длиной свободного пробега молекулы.

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

где η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость), ρ – плотность газа, $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега, \bar{v} – средняя арифметическая скорость молекул, т. е. среднее значение абсолютной величины скорости молекул.

Из формулы (1) получаем

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

Вязкость можно определить, воспользовавшись известной формулой Пуазейля, выражающей вязкость через объем V газа, протекающего через сечение трубки за определенное время t при определенной разности давлений Δp , на концах трубки:

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8vl} \Delta p t \quad (3)$$

где r – радиус, l – длина трубки.

При выводе формулы (3) пренебрегли кривизной капли вытекающей жидкости (эта поправка в данной задаче составляет менее 3%).

Средняя скорость газовых молекул может быть найдена из закона распределения Максвелла:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (4)$$

где R – молярная газовая постоянная, T – абсолютная температура, μ – молярная масса газа.

Плотность газа можно найти из уравнения Клапейрона – Менделеева.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT} \quad (5)$$

где p – давление газа.

Подставляя (3), (4) и (5) в формулу (2), получим

$$\bar{\lambda} = \frac{3\pi r^4 \Delta p t \sqrt{\pi RT}}{16vlp\sqrt{2\mu}} \quad (6)$$

Для вычисления длины свободного пробега по формуле (6) необходимо знать радиус и длину трубки, через которую протекает газ, разность давлений на её концах, температуру и давление окружающей среды, и объем газа, протекающего через трубку, за определенное время.

2. Приборы и принадлежности: аспиратор, капилляр, водяной манометр, осушитель, секундомер, сосуд для сбора воды.

Если открыть кран, вода выливается из сосуда, а над поверхностью воды создается пониженное давление. Таким образом, концы капилляра будут находиться под разным давлением. Один, соединенный с осушителем, – под атмосферным давлением, другой, соединенный с аспиратором, – меньше атмосферного, что обуславливает протекание воздуха через капилляр. Для отсчета разности давлений служит водяной манометр 5.

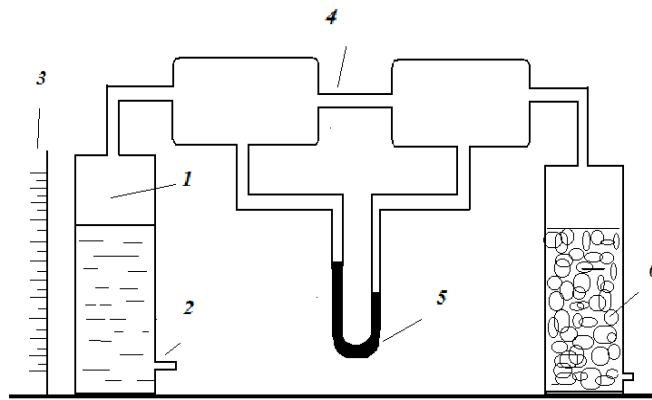


Рис. 1. Установка для выполнения работы состоит из аспиратора 1 с краном 2. Для отсчета уровней воды на аспираторе имеется шкала делений 3. Аспиратор закрыт пробкой с пропущенной через нее трубкой, которая сообщается с капилляром 4.

3. Выполнение работы.

- 3.1. Заполните аспиратор водой.
- 3.2. Установите его на столе, закройте пробкой.
- 3.3. Установите под краном 2 сосуд для приема воды.
- 3.4. Откройте кран осушителя 6, наполненного CaCl_2 .
- 3.5. Откройте кран 2 аспиратора 1.
- 3.6. Когда установится стационарное течение воды (выльется примерно 1-1,5 л), разность уровней манометра перестанет меняться. Отметьте по шкале 3 начальный уровень воды.
- 3.7. Включите секундомер.
- 3.8. Запишите показания p манометра 5 в мм водяного столба.
- 3.9. Когда из аспиратора выльется 2–2,5 л воды, выключите секундомер. Запишите время истечения жидкости t . Объем воздуха, прошедшего через капилляр, равен объему вытекшей воды.
- 3.10. Определите по барометру давление p , а по комнатному термометру t , соответствующие условиям опыта.
- 3.11. Значения радиуса и длины капилляра соответствуют $r = 75\text{ мм}$, $l = 8,5\text{ см}$.
- 3.12. Вычислите длину свободного пробега по формуле (6). Данные опыта перед вычислением перевести с СИ.
- 4.13. Опыт повторите 3 раза.
- 4.14. Оцените возможные источники погрешности метода.

4. Контрольные вопросы.

4.1. Как понимать термин «столкновение молекул»? От каких параметров зависит среднее число столкновений в единице объема газа за одну секунду (\bar{Z})? Как аналитически выражается эта зависимость?

4.2. Что такое «средняя длина свободного пробега молекул»? Каков порядок этой величины для газов, находящихся при нормальных условиях? От каких параметров состояния газа (p, T, V) она зависит и какова эта зависимость?

4.3. Как изменяется «эффективный диаметр» с температурой? Приведите формулу.

4.4. Что такое «вакуум» с точки зрения длины свободного пробега? Почему понятие вакуума считается относительным?

4.5. Какие процессы в газах объединяются понятием «явление переноса»? Что общего во всех этих процессах? Являются ли они обратимыми?

4.6. Как записывается общее уравнение переноса? Какие условия налагаются на газ при выводе этого уравнения?

4.7. Как получить из общего уравнения переноса закон вязкости, закон диффузии?

4.8. В чем сущность явления внутреннего трения? Запишите уравнение, определяющее силу внутреннего трения.

4.9. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения? Какими формулами он определяется? Какая связь между коэффициентами динамической и кинематической вязкости? Какова размерность этих коэффициентов?

5. Литература.

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М : Высшая школа, 1981.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука.

3. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – Т. 1. – М. : Наука, 1989.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МОЛЕКУЛЫ МАСЛА

Цель работы: определение длины и площади поперечного сечения молекулы масла по методу Ленгмюра и Дево.

Принадлежности: плоский сосуд с водой и координатной сеткой, порошок талька, торсионные весы, бюретка с маслом, закрепленная в штативе.

1. Введение.

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

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

Однако в тех случаях, когда силы поверхностного натяжения значительно превосходят силы тяжести, свободная поверхность жидкости приближается к сферической (шаровидность мелких капель жидкости).

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

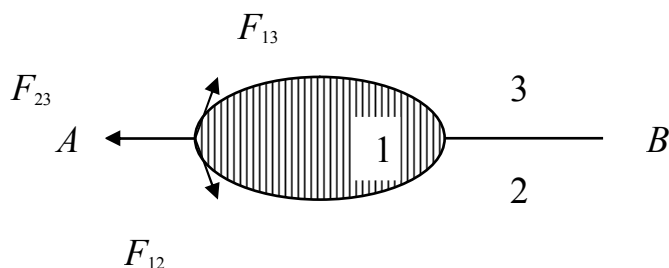


Рис. 1. Форма капли устанавливается в данном случае под влиянием взаимодействия трех сред: жидкости 1, жидкости 2 и воздуха 3. Эти среды имеют общую границу - окружность, ограничивающую каплю и пересекающую плоскость чертежа по линии АВ.

По этой окружности пересекаются три поверхности: поверхность, разграничивающая воздух и жидкость 2 с соответствующим для данной ситуации коэффициентом поверхностного натяжения α_{23} , поверхность, разграничивающая воздух и жидкость с коэффициентом поверхностного натяжения α_{13} и поверхность, разграничивающая жидкости 1 и 2 с соответствующим коэффициентом поверхностного натяжения α_{12} .

На каждую единицу длины пограничной окружности будут действовать три силы поверхностного натяжения F_{13} , F_{12} , F_{23} , численно равные соответственно значениям α_{13} , α_{12} , α_{23} .

Эти силы будут направлены перпендикулярно к отдельным элементам окружности и по касательным к соответствующим поверхностям раздела.

В случае, когда можно пренебречь силой тяжести по сравнению с силами поверхностного натяжения, равновесной будет та форма капли, при которой

$$F_{23} + F_{12} + F_{13} = 0 \text{ или } F_{23} = F_{13} \cos \varphi_{13} + F_{12} \cos \varphi_{12}$$

Отсюда следует, что в случае равновесия

$$F_{23} \leq F_{13} + F_{12}, \alpha_{23} < \alpha_{13} + \alpha_{12} \text{ т.к. } \cos \varphi_{13} < 1, \cos \varphi_{12} < 1.$$

Если $F_{23} > F_{13} + F_{12}$, т.е. $\alpha_{23} > \alpha_{13} + \alpha_{12}$, то равновесие капли невозможно и поэтому жидкость 1 растекается по поверхности жидкости 2 в виде тонкой пленки.

Многие органические жидкости (эфир, скипидар, керосин) растекаются по поверхности воды. Для некоторых жидкостей (бензол, жирные кислоты, масло) явление растекания наблюдается только для первых капель, помещенных на поверхность чистой воды. Последующие капли уже не растекаются, а остаются на поверхности воды в виде устойчивых капель. Это объясняется тем, что первые капли, растекаясь, загрязняют ее поверхность и уменьшают поверхностное натяжение настолько, что равновесие капель становится возможным.

Многочисленные эксперименты, в частности опыты Ленгмюра, Дэво, Рэля и других, привели к выводам, что если площадь поверхности воды достаточно велика, то капля масла (касторного, прованского или жирных кислот) соответствующего объема растекаются в очень тонкий мономолекулярный слой.

Произведенные вычисления показали, что площадь S_μ , занимаемая каждой молекулой, очень мала. Так для жирных кислот $S_\mu = 21 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$. такую молекулу можно рассматривать как образование, сильно вытянутую в длину, нечто вроде удлиненного цилиндра как это показано на рис. 2.

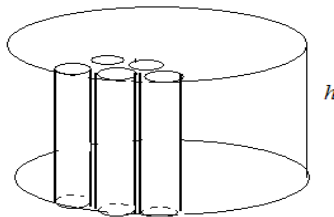


Рис. 2. Расположение молекул жирных кислот на поверхности воды.

В данной работе для определения размеров молекул масла используется метод, предложенный Ленгмюром и Дево.

2. Описание и порядок проведения эксперимента.

Если капля масла попадает на поверхность воды, то она, растекаясь, образует мономолекулярный слой. Если поверхность воды посыпать предварительно тальком или слоем пробковых опилок, то на ней образуется ясно видимое, свободное от порошка круглое пятно. Это дает возможность по диаметру круга D приблизительно рассчитать площадь поперечного сечения одной молекулы масла.

Если в капле содержится N молекул масла с поперечным сечением S_μ , то $S_\mu \cdot N = S$. Отсюда

$$S_\mu = \frac{S}{N} = \frac{\pi D^2}{4N}$$

Число молекул в капле можно найти, если известны масса капли и ее молярная масса $N = \frac{m}{\mu} N_A$. Тогда

$$S_\mu = \frac{\pi D^2 \mu}{4m N_A}$$

Длину молекулы h грубо можно оценить, пользуясь следующими соображениями: $h = \frac{V}{S}$, где V - объем мономолекулярного слоя ($V = \frac{m}{\rho}$), а ρ – плот-

ность масла. Отсюда

$$h = \frac{4m}{\pi \rho D^2}$$

Порядок проведения эксперимента.

1. Тщательно помытый и обезжиренный сосуд наполнить водой.
2. установите сосуд на подставку под бюреткой с маслом, закрепленной в штативе (желательно совместить центр сосуда и бюретку).
3. Посыпьте тонким слоем порошка поверхность воды.
4. Из бюретки нанесите каплю масла в центр сосуда.
5. Когда капля перестанет растекаться, измерьте диаметр получившегося круга в двух- трех взаимно перпендикулярных направлениях.
6. Проведите опыт два- три раза, тщательно промывая и обезжиривая сосуд после каждого эксперимента.
7. Путем взвешивания капли на торсионных весах определите массу капли, которую получаем из используемой в эксперименте бюретки (для более точного взвешивания следует взять несколько капель).

8. По формулам (1) и (2) рассчитайте площадь поперечного сечения и длину молекулы масла (плотность масла используемого в работе $\rho = 905 \text{ кг/м}^2$, молекулярная масса $\mu = 92 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$).

9. Оцените абсолютную и относительную погрешности проведенных расчетов.

10. Вычислите эффективный диаметр молекулы масла, считая $S_{\mu} \approx \sigma^2$.

3. Контрольные вопросы.

1. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения?

2. Какую размерность имеет единица измерения коэффициента поверхностного натяжения в системе СИ?

3. Каково значение коэффициента поверхностного натяжения при критической температуре и почему?

4. Какое значение имеют явления смачивания и не смачивания в природе и технике?

5. Каковы современные представления о структуре жидкости?

6. Что такое эффективное сечение молекулы?

7. Как изменяется эффективное сечение молекул с температурой?

4. Литература.

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Наука, 1981.

2. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ C_p/C_v МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Цель работы: изучить теорию теплоемкости, уяснить сущность адиабатического процесса и вывод уравнений Пуассона. Изучить метод Клемана и Дезорма по определению отношения теплоемкостей C_p/C_v .

В работе используются: прибор Клемана – Дезорма, насос Камовского, U – образный термометр.

1. Введение.

Вплоть до 19 века тепловые явления объяснялись существованием теплорода. И, хотя теория теплорода отвергнута в результате достижений науки в области молекулярно-кинетической теории, термодинамики, квантовой механики, но до сих пор употребляют термины, свойственные теории теплорода: количество теплоты, теплоемкость и др.

Теплоемкостью тела (системы) называется величина, равная отношению сообщенного телу количества теплоты δQ к вызванному этим процессом повышению температуры dT ; или иначе, величина, показывающая какое количество теплоты надо сообщить телу для нагревания его на один градус Кельвина:

$$c = \frac{\delta Q}{dT} \quad [\text{Дж/К}] \quad (1)$$

Различают удельную теплоемкость c – теплоемкость одного килограмма вещества:

$$c = \frac{dQ}{mdT} = [\text{Дж/кг}\cdot\text{К}] \quad (2)$$

и молярную теплоемкость c_μ – теплоемкость одного моля вещества:

$$\text{—} \quad (3)$$

Очевидно соотношение между удельной и молярной теплоемкостями:

$$c = \frac{c_\mu}{\mu} \quad (4)$$

Например, удельная теплоемкость меди – 395 Дж/кг·К (при 20°C), воды – 4181 Дж/кг·К (при 20°C), водорода – 14 273 Дж/кг·К (при 10 – 200°C и 760 мм рт. ст.).

Величина удельной теплоемкости одного и того же вещества не является постоянной, а зависит от множества факторов, в частности от температуры. Для газов, кроме того, теплоемкость зависит от условий нагревания: происходит ли оно при постоянном давлении или при постоянном объеме. Поэтому для газов различают две удельные теплоемкости: теплоемкость при постоянном давлении C_p и теплоемкость при постоянном объеме C_v , причем для всех газов выполняется соотношение $C_p > C_v$.

Для жидкостей и твердых тел зависимость теплоемкости от изменения объема при нагревании незначительна, но существенно меняется с изменением температуры.

Примечание. Теплоемкость воды имеет некоторый минимум вблизи 30°C, теплоемкость при 20°C близка к среднему значению теплоемкости воды в интервале от 0 до 100°C ($C = 4, 186$ Дж/ккал) и принимается в качестве табличного значения теплоемкости воды.

Найдем выражения для C_p и C_v из первого начала термодинамики, предполагая газ идеальным и массу газа равной одному молю.

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (5)$$

Найдем слагаемые уравнения: $\delta A = pdv$

$$U = N \cdot E_K = N \frac{i \cdot kT}{2} = \frac{m}{\mu} N_A \frac{i \cdot kT}{2} = \frac{m \cdot i \cdot RT}{\mu \cdot 2}, \quad (6)$$

где N – число молекул газа массой m , E_K – средняя кинетическая энергия одной молекулы газа, i – число степеней свободы молекулы газа, $k = \frac{R}{N_A}$ – постоянная

Больцмана, R – универсальная газовая постоянная, N – число Авогадро.

Тогда

$$\delta U = \frac{m}{\mu} = \frac{i \cdot R dT}{2} \quad (7)$$

Найдем δQ из выражения (3). Для одного моля газа:

$$\delta Q = c_{\mu} \frac{m dT}{\mu} \quad (8)$$

Подставим (6), (7), (8) в выражение (5):

$$c \frac{m}{\mu} dT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT + p dV \quad (9)$$

Для изохорического процесса $V = \text{const}$, следовательно, приращение $p dV = 0$.

Тогда (9) запишется: $c_v \frac{m}{\mu} dT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$, откуда

$$c_v = \frac{i}{2} R \quad (10)$$

Для изобарического процесса δA найдем из уравнения Клапейрона – Менделеева $A = p dV = \frac{m}{\mu} R dT$: тогда (9) запишется как

$$c_p \frac{m}{\mu} dT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT + \frac{m}{\mu} R dT$$

$$c_p = \frac{i}{2} R + R$$

$$c_p = \frac{i+2}{2} R \quad (11)$$

$$c_p = c_v + R \quad (12)$$

Выражение (12) называется *уравнением Майера*.

Классическая теория теплоемкости, исходя из молекулярного строения вещества, объясняет физический смысл теплоемкостей C_p и C_v следующим образом: они постоянны, не зависят от температуры и могут принимать лишь значения, кратные числу степеней свободы i молекул газа. Для одноатомного газа $i = 3$, для двухатомного газа с жесткой связью атомов $i = 5$, для двухатомного газа с упругой связью атомов $i = 7$, для газа с числом атомов три и более $i = 6$.

Газ	Кол-во атомов в молек	Характер связи м/у атомами	Число степеней свободы i .				$c_v \cdot 10^{-3}$ Дж/моль·К	$c_p \cdot 10^{-3}$ Дж/моль·К
			Пост.	Вращ.	Колеб.	всего		
Г гелий (He)	1	-	3	-	-	3	$3/2 \cdot R =$ $=12,5$	$5/2 \cdot R =$ $=20,8$
Кислор. (O ₂)	2	жесткая	3	2	-	5	$5/2 \cdot R =$ $=20,8$	$7/2 \cdot R =$ $=29,1$
Пары воды (H ₂ O)	3	жесткая	3	3	-	6	$6/2 \cdot R =$ $=25,0$	$8/2 \cdot R =$ $=33,2$

Вычисленные таким образом значения c_p и c_v хорошо согласуются с экспериментальными значениями, полученными для одноатомных и двухатомных газов при температурах, близких к комнатной. Однако при низких температурах и повышенных давлениях, а также для многоатомных газов экспериментальные значения c_p и c_v заметно отличаются от теоретических и зависят от температуры. Удовлетворительное объяснение опытным данным дает только квантовая

теория теплоемкости. Коэффициентом Пуассона называется отношение $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, которое является характерным для каждого газа.

Из выражений (10) и (11) $\gamma = \frac{i+2}{i}$. Коэффициент Пуассона играет в термодинамике важную роль, в частности он входит в уравнение Пуассона для адиабатического процесса:

$$pV^\gamma = const, \quad (14)$$

где $\gamma = 1,67$ для одноатомного газа,

$\gamma = 1,40$ для двухатомного газа с жесткой связью атомов,

$\gamma = 1,29$ для двухатомного газа с упругой связью атомов,

$\gamma = 1,33$ для трехатомного газа.

Адиабатический процесс является частным случаем политропического процесса:

$$pV^n = const, \quad (15)$$

Политропическим называется процесс, при котором теплоемкость газа остается постоянной ($c = const$). Показатель политропы n может принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$. При $n = 0$ процесс будет изобарическим, при $n = 1$ – изотермическим, при $n = \gamma$ – адиабатическим при $n = \pm \infty$ – изохорическим.

2. Описание и порядок проведения эксперимента.

Непосредственное определение теплоемкостей c_v и c_p затруднительно, особенно удельной теплоемкости c_p . Однако их отношение $\gamma = c_p / c_v$ довольно легко найти экспериментально методом Клемана и Дезорма.

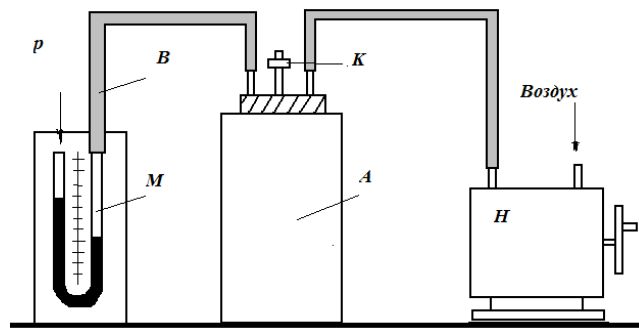


Рис. 1. Установка состоит из стеклянного сосуда А, который сообщается с трубкой В, ведущей к ручному насосу Н и манометру М. Колено 1 манометра регистрирует атмосферное давление, колено 2 – давление в сосуде А. Кран К позволяет сообщать сосуд А с атмосферой и имеет большой диаметр.

Пусть первоначально в сосуде А находился воздух при атмосферном давлении p_0 и комнатной температуре T_0 . С помощью насоса Н быстро накачаем небольшое количество воздуха в сосуд, так, чтобы разность уровней в коленах манометра составила 5 – 10 см. Давление воздуха в сосуде станет избыточным, его температура повысится. Спустя 1–2 мин температура опять станет комнатной (благодаря теплообмену через стенки сосудов), а давление немного упадет, но будет превышать атмосферное. Это установившееся значение p_1 , T_1 будем считать первым состоянием газа:

$$(I) \quad T_1 = T_0, \quad p_1 = p_0 + h_1, \quad (16)$$

где h_1 – разность уровней жидкости в коленах манометра (p_1 и h_1 выражены в ммрт ст.).

Откроем и быстро закроем кран K , сообщая сосуд с атмосферой. Практически сразу давление воздуха в сосуде станет равным атмосферному (т.к. кран имеет отверстие большего диаметра), а температура газа понизится и станет ниже комнатной. Это второе состояние p_2, T_2 :

$$(II) \quad T_2 < T_1, \quad p_2 = p_0 \quad (17)$$

Процесс можно считать адиабатическим, т.к. он происходит быстро, и обменом через стенки сосуда можно пренебречь.

Через некоторое время воздух в сосуде вновь нагреется до комнатной температуры, а давление увеличится и станет выше атмосферного. Это третье состояние p_3, T_3 :

$$(III) \quad T_3 = T_0, \quad p_3 = p_0 + h_2, \quad (18)$$

где h_2 – разность уровней манометра в третьем состоянии. Процесс II – III происходит без изменения объема воздуха в сосуде, т.е. является изохорическим.

Выведем расчетную формулу опыта.

Для адиабатического процесса применим уравнение Пуассона в координатах pT :

$$p_1^{1-\gamma} \cdot T_1^\gamma = p_2^{1-\gamma} \cdot T_2^\gamma$$

Или из II:

$$p_1^{1-\gamma} \cdot T_0^\gamma = p_0^{1-\gamma} \cdot T_2^\gamma$$

Отсюда

$$\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{T_2}{T_0}\right)^\gamma \quad (19)$$

Для изохорического процесса II – III применим закон Гей-Люссака: $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$,

$$\text{или из III:} \quad \frac{p_0}{T_2} = \frac{p_3}{T_0}, \quad \frac{p_0}{p_3} = \frac{T_2}{T_0} \quad (20)$$

Исключим из (16) и (17) отношение температур, которые не определяются во время опыта.

$$\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{p_3}{p_0}\right)^{-\gamma}$$

Подставим значения p_1 из (16) и p_3 из (18):

$$\left(\frac{p_0 + h_1}{p_0}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{p_0 + h_2}{p_0}\right)^{-\gamma};$$

$$\left(1 + \frac{h_1}{p_0}\right)^{1-\gamma} = \left(1 + \frac{h_2}{p_0}\right)^{-\gamma}$$

Отношение $h_1/p_0 \approx 0,01$ и $h_2/p_0 \approx 0,01$, поэтому применить формулу приближенных вычислений: если $x \ll 1$, то $(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx$.

$$\text{Тогда} \quad 1 + (1-\gamma)\frac{h_1}{p_0} = 1 + (-\gamma)\frac{h_2}{p_0}$$

Отсюда получим расчетную формулу опыта:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (21)$$

Таким образом, для определения $\gamma = c_p / c_v$ данным методом нужно знать только избыточные давления h_1 и h_2 в первом и третьем состояниях.

Порядок выполнения работы.

1. Закрыв плотно кран K , при помощи насоса H быстро накачать воздух так, чтобы разность уровней жидкости в манометре составила 5–10 см. При этом следует соблюдать осторожность, т.к. при дальнейшем накачивании жидкость может вылиться из манометра!

2. Выждать, пока температура внутри сосуда станет равной температуре окружающей среды, т.е. пока уровни жидкости в манометре установятся. Это происходит через 1–2 мин.

3. Отсчитать разность уровней манометра h_1 (по нижнему краю мениска).

4. Открыть кран K и как можно быстрее закрыть его.

5. Подождать еще 1–2 мин, пока температура воздуха в сосуде станет равной комнатной, т.е. пока жидкость в манометре установится. Отсчитать разность уровней h_2 .

6. Вычислить γ .

7. Опыт повторить 3–5 раз и составить таблицу.

Примечание. Точность в определении γ зависит от точности считывания h_1 и h_2 , которая будет тем выше, чем выше значение h_1 и h_2 . Кроме того, погрешность тем меньше, чем ближе реальные процессы приближаются к адиабатическому (т.е. надо открывать – закрывать кран достаточно быстро).

3. Контрольные вопросы.

1. Что такое «идеальный» газ?

2. Дайте определение «внутренней энергии» идеального газа, из чего она складывается? Функцией каких термодинамических параметров состояния является внутренняя энергия идеального газа?

3. Что такое «число степеней свободы»? Чему оно равно для молекул различных газов? Каково содержание теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы?

4. Приведите формулы и графики для элементарной и полной работы газа. Как понимать, что работа газа не является полным дифференциалом?

5. Выведите формулы работы газа для изохорического, изобарического и изотермического процессов. Как найти (в общем виде) работу газа для адиабатического процесса?

6. Сформулируйте первое начало термодинамики, раскройте его физический смысл.

7. Дайте определение теплоемкости газа. От чего зависит величина теплоемкости? В чем заключается физическая причина различия значений теплоемкостей c_p и c_v с точки зрения классической теории теплоемкости? Какова связь между теплоемкостями c_p и c_v ?

8. Границы применимости выражений для теплоемкостей c_p и c_v . Приведите график зависимости $c_v = f(T)$, объясните его с точки зрения квантовой теории теплоемкости.

9. Дайте определение адиабатического процесса, приведите примеры. Как вывести уравнение этого процесса для идеального газа из первого начала термодинамики? Приведите выражение для коэффициента Пуассона, объясните его.

10. Запишите уравнение Пуассона в различных переменных ($p, V; T, V; p, T$). Сравните кривые адиабаты и изотермы, построенные на одном графике в координатах p, V .

11. Какому условию удовлетворяют процессы, называемые политропическими? Как записываются уравнения этих процессов?

4. Литература.

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Наука, 1981.
2. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: изучение методов определения влажности воздуха.

В работе используются: гигрометр Ламбрехта, термометр, эфир, психрометр Августа, психрометр Ассмана.

1. Введение.

Испарением (парообразованием) называют переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Обратный переход вещества из газообразного состояния в жидкое называют *конденсацией*.

Рассмотрим фазовый переход жидкость-газ, происходящий в замкнутом объеме в отсутствие других газов, кроме пара этой жидкости.

Испарение молекул с поверхности жидкостей происходит при любой температуре. Испарение будет тем интенсивней, чем выше температура жидкости (кинетическая энергия большего числа молекул становится достаточной для преодоления сил поверхностного притяжения), чем меньше внешнее давление, которое препятствует отрыву молекул. Скорость испарения увеличивается также при удалении образовавшихся над жидкостью паров. Испарение происходит интенсивнее у тех жидкостей, у которых меньше силы притяжения между молекулами (т.н. летучие жидкости, например, эфир).

Одновременно с испарением происходит процесс конденсации. Часть испарившихся молекул может приблизиться к поверхности жидкости и, попав в сферу ее молекулярного действия, вновь перейти в жидкость. Также газ может конденсироваться в виде мелких капель, которые затем укрупняются и выпадают в жидкость.

В начале испарения число молекул, вылетающих из жидкости, больше, чем число возвращающихся. Такой пар называется *ненасыщенным (перегретым)*. По мере увеличения числа молекул над жидкостью, их возвращается все больше и больше. Наконец, при некотором предельном числе молекул над поверхностью количество вылетающих и возвращающихся молекул сравнивается, наступает состояние динамического равновесия. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным (насыщающим)*. При некоторых условиях пар может содержать больше молекул, чем в насыщенном состоянии. Такой пар называется *перенасыщенным*; это состояние нестабильно. Давление (или *упругость*) насыщенного пара P_0 измеряется в [Па] или [мм. рт. ст].

Свойства насыщенных паров:

1. В состоянии насыщения в пространстве над жидкостью «удерживается» максимальное при данной температуре число молекул. Дальнейшее увеличение количества молекул в паре невозможно – «лишние» молекулы начнут конденсировать. Следовательно, и *давление насыщенного пара P_0* будет максимально возможным при данной температуре.

2. С понижением температуры системы жидкость-пар меньшее число молекул будет участвовать в процессе испарения и конденсации, т.к. снижается кинетическая энергия молекул. Состояние насыщения наступает при меньшем значении давления насыщенного пара P_0 . Количественно зависимость давления насыщенного пара от температуры описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса.

3. Давление насыщенного пара при неизменной температуре не зависит от объема, предоставленного пару.

4. Насыщенный пар не является идеальным газом, он подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса для реальных газов. Насыщенный пар подчиняется законам газового состояния, тем прочнее, чем он дальше от насыщения.

5. Давление насыщенных паров различных жидкостей, находящихся при одной и той же температуре, разное; оно больше у летучих жидкостей.

Влажность воздуха.

В воздухе всегда присутствуют пары воды. Давление воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара: $P = P_{\text{сух}} + P_{\text{вод}}$.

Для количественной характеристики влажности воздуха пользуются понятиями абсолютной влажности, относительной влажности и дефицита влажности.

Абсолютной влажностью воздуха называется физическая величина, численно равная массе водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха при данной температуре, т.е. плотность $\rho = m/V$ водяного пара. Обычно абсолютную влажность выражают в [г/м³].

Ощущение человеком сухости или сырости воздуха связано не с абсолютной влажностью, а с относительной. *Относительная влажность* – это отношение плотности водяного пара ρ (абсолютной влажности) к плотности насыщенного пара ρ_0 , находящегося при той же температуре. Относительную влажность чаще всего выражают в процентах:

$$r = \rho/\rho_0 \cdot 100\% \quad (1)$$

Относительная влажность воздуха растет с понижением температуры, т.к. с понижением температуры абсолютная влажность ρ не меняется (масса испаренной воды остается прежней), а плотность ρ_0 насыщенного пара уменьшается (см. табл. 1).

Если содержащийся в воздухе водяной пар ненасыщенный, то при понижении температуры тот же пар может стать насыщенным.

Пример. Если при 20°C в каждом кубическом метре воздуха содержалось, например, 9,4 г водяного пара, то этот пар был ненасыщенным, т.к. для насыщения при 20°C требуется испарить $17,3 \text{ г/м}^3$ воды. Но при снижении температуры до 10°C этого пара достаточно для насыщения. (см. табл. 1).

Температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называется *точкой росы*. Понижение температуры ниже точки росы вызовет конденсацию излишков пара.

При $t = (-20 \dots 30)^{\circ}\text{C}$ плотность ρ_0 насыщенного водяного пара приблизительно равна его давлению (упругости) P_0 , а при $t = 15^{\circ}\text{C}$ они численно равны ($12,8 \text{ г/м}^3$ и $12,8 \text{ мм рт. ст.}$). Поэтому в указанном диапазоне можно вычислить относительную влажность как:

$$r = P/P_0 * 100 \% \quad (2)$$

При $t > 30^{\circ}\text{C}$ плотность водяного пара не равна его давлению, приблизительно можно вычислить плотность из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$P = \rho/\mu * RT,$$

где P – давление водяного пара при температуре T , ρ – его плотность при этой же температуре, $\mu = 18 \text{ г/м}^3$ – молярная масса воды.

Разность между упругостью насыщенного пара и упругостью водяного пара, имеющегося фактически в воздухе при той же температуре, называется *дефицитом влажности*:

$$D = P_0 - P \quad (3)$$

Влажность воздуха измеряют гигрометрами и психрометрами. Абсолютную влажность воздуха можно определить и непосредственно методом взвешивания. Для этого пропускают определенный объем воздуха через трубки, содержащие вещества, поглощающие водяные пары (хлористый кальций, фосфорный ангидрит), и находят разность масс содержимого пробирки до пропускания воздуха и после пропускания. Однако определение влажности воздуха гигрометрами и психрометрами более удобно.

Определение влажности воздуха волосным гигрометром.

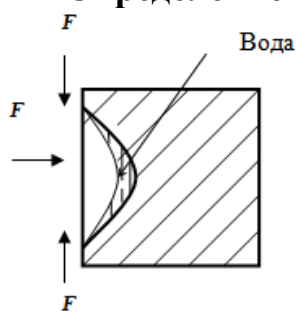


Рис. 1.

При температуре выше минус 5°C для измерения влажности могут быть использованы волосной и пленочный гигрометры. Действие волосного гигрометра основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса изменять свою длину при изменении относительной влажности. Человеческий волос пронизан многочисленными порами, заполненные жировыми веществами и пигментом.

Если путем соответствующей обработки удалить жировые вещества, то эти поры заполняются влагой. По теории Срезневского, в порах образуются мениски воды такой кривизны, что упругость насыщения над ними оказывается в точности равной упругости пара в воздухе. При этом, если влажность воздуха меняется, то в след за этим меняется и кривизна менисков, что влечет за собой изменения капиллярного давления. При уменьшении влажности мениски воды становятся более криволинейными, капиллярное давление увеличивается, и поры стягиваются, вызывая общее уменьшение длины волоса. При увеличении влажности мениски выпрямляются, капиллярное давление ослабевает, и ширина пор увеличивается, в результате этого волос удлиняется.

В последнее время получили широкое распространение пленочные гигрометры, в которых изготовленная особым образом органическая пленка реагирует на изменение влажности подобно человеческому волосу.

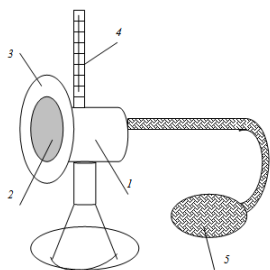


Рис. 2. Лабораторный конденсационный гигрометр (гигрометр Ламбрехта): состоит из пластмассового корпуса 1, металлического полированного зеркала камеры 2, которое окружено полированным кольцом 3. Термометра 4 установленного в отверстие корпуса и груши 5.

Определение влажности воздуха гигрометром Ламбрехта

В отверстие корпуса заливается жидкость с низкой температурой кипения, например, эфир. При помощи груши 5 через эфир продувается воздух, в результате чего происходит усиленное испарение жидкости, и металлическое зеркало камеры охлаждается.

Температура, фиксируемая термометром в момент появления конденсата, и есть точка росы. Чтобы легче было обнаружить образование конденсата в начальной стадии, между зеркалом и полированным кольцом имеется небольшой просвет, предохраняющий кольцо от охлаждения. Поэтому в момент появления росы налет обнаруживается только на зеркале камеры. При наблюдениях рекомендуется располагать между наблюдателем и прибором стеклянную перегородку, чтобы не изменять дыханием влажность воздуха вблизи поверхности зеркала. Гигрометр Ламбрехта позволяет определять абсолютную влажность при температуре воздуха от 10 до 35 °С.

Определение влажности воздуха с помощью психрометров.

Относительная влажность воздуха может быть определена по показаниям психрометра и психрометрическим таблицам. Наиболее часто используют психрометры Августа (стационарный психрометр) и психрометр Ассмана (вентиляционный, или аспирационный, психрометр). Принцип действия обоих психрометров одинаков.

Каждый психрометр состоит из двух одинаковых термометров. Резервуар одного из термометров обмотан батистом и смачивается дистиллированной водой. Сухой термометр психрометра показывает температуру воздуха t_c , а влажный (в случае, если водяной пар в воздухе не является насыщенным) – температуру t_B ,

более низкую и зависящую от влажности окружающего воздуха. Разность температур ($t_C - t_B$) тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха.

Разность температур сухого и влажного термометров пропорциональна разности давления насыщенного пара при температуре влажного термометра и давления водяного пара, находящегося в воздухе. Абсолютную влажность можно найти по психометрической формуле (формула Ренье):

$$P = P_{OB} - AH(t_C - t_B), \quad (4)$$

где P – абсолютная влажность воздуха, P_{OB} – давление насыщенного пара при температуре влажного термометра, t_C – температура сухого термометра, t_B – температура влажного термометра, H – атмосферное давление в мм рт. ст., A – постоянная психрометра, зависящая от его конструкции и скорости обтекания воздухом резервуара влажного термометра. Скорость обтекания воздухом резервуаров сухого и влажного термометров должна быть одинакова.

Аспирационный психрометр состоит из термометров 1 и 2 со шкалой до $50^{\circ}C$, резервуар одного из них обмотан батистом. Оба термометра заключены в металлическую никелированную оправу 3. Резервуары термометра находятся в двойных металлических гильзах 4, что исключает влияние теплового излучения на показания термометров, если только оно не падает на прибор снизу. В головке прибора имеется вентилятор с часовым механизмом 5, обдувающий воздухом резервуары термометров с постоянной скоростью 2 м/с, благодаря чему, экспозиция прибора всего 3–5 мин.

Психрометр предназначен для определения относительной влажности при отсутствии воздушных потоков. Внешний вид психрометра Августа представлен на рис. 3, где 1 – сухой термометр, 2 – влажный термометр, 3 – прикладная психометрическая таблица. Для психрометра Августа формула Ренье (4) принимает вид:

$$P = P_{OB} - 0,0008 * H (t_C - t_B), \quad \text{если } t_C > 0^{\circ}C \quad (5)$$

$$P = P_{OB} - 0,00069 * H (t_C - t_B), \quad \text{если } t_C < 0^{\circ}C \quad (6)$$

При использовании вентиляционного психрометра Ассмана абсолютная влажность вычисляется по формуле Шпрунга:

$$P = P_{OB} - 0,5(t_C - t_B) H / 755 \quad (7)$$

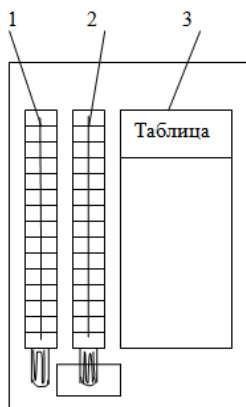


Рис. 3.

Аспирационный психрометр Августа.

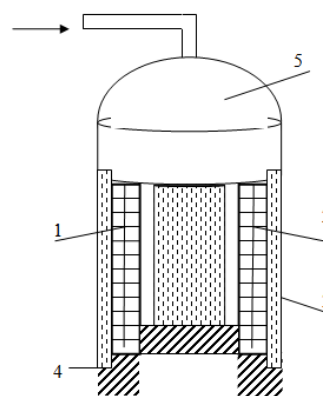


Рис. 4.

Аспирационный психрометр Ассмана.

2. Описание и порядок выполнения работы.

Порядок работы с гигрометром Ламбрехта:

- 1) Тщательно протереть суконкой полированное зеркало и кольцо.
- 2) Опустить термометр в отверстие корпуса и наполнить корпус эфиром так, чтобы шарик термометра был полностью погружен в эфир.
- 3) Отметить температуру окружающего воздуха.
- 4) Энергично продувать воздух грушей, при этом внимательно следить за поверхностью зеркала, сравнивая ее с поверхностью кольца.
- 5) В момент появления налета (росы) записать показания термометра t_1 , затем прекратить продувание и записать температуру исчезновения налета t_2 .
- 6) Вычислить среднюю температуру точки росы.
- 7) Найти на таблице 1 плотность насыщенного пара, соответствующую средней температуре точки росы. Это и есть количество (в граммах) водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха при комнатной температуре, т.е. абсолютная влажность.
- 8) Найти по таблице 1 давление насыщенного пара, соответствующее средней температуре точке росы.
- 9) Для нахождения относительной влажности найти в таблице 1 еще одно значение – плотность насыщенного пара, которая была бы необходима для насыщения воздуха при комнатной температуре ρ_0 и соответствующее давление P_0 . По формуле (2) вычислить относительную влажность.
- 10) По формуле (3) найти дефицит влажности.

Порядок работы с психрометром Августа.

- 1) Запомнить питатель дистиллированной водой. Фитиль из батиста не должен касаться стенок питателя.
- 2) Выдержав термометр не менее 5 минут снять показания сухого и влажного термометров. Вычислить разность их температур.
- 3) Определить относительную влажность среды по психометрической таблице.

Если измеренная разность температур сухого и влажного термометров Δt отсутствует в психометрической таблице, необходимо вычислить реальную относительную влажность.

Пример. $t_C = +20,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_B = +16,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Разность температур $\Delta t = 3,8 \text{ }^\circ\text{C}$. По психометрической таблице для ближайшей разности $\Delta t = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ относительная влажность $r = 59\%$, а для разности $\Delta t = 4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ - $r = 54\%$. Таким образом, при изменении Δt на $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ влажность r изменится на 5%. Тогда изменению Δt на $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ будет соответствовать изменение r на 3%. Отнимаем: $59\% - 3\% = 56\%$ - для $\Delta t = 3,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

- 4) Определить абсолютную влажность по формуле (1) и дефицит влажности по формуле (3).
- 5) Вычислить абсолютную влажность по формуле (5).

Порядок работы с психрометром Ассмана:

- 1) Смочите дистиллированной водой батист на резервуаре термометра с помощью пипетки, перевернув психрометр вверх.
- 2) Заведите вентилятор психрометра на несколько оборотов. Произведите отсчет по термометрам по истечению 3 минут.

3) Определите относительную влажность, пользуясь психрометрической таблицей 2.

4) Определите абсолютную влажность по формуле (1) и дефицит влажности по формуле (3).

5) Вычислить абсолютную влажность по формуле (7).

3. Контрольные вопросы.

1. Дайте определения: фазовое состояние вещества, конденсация, испарение. Насыщенный, ненасыщенный, перенасыщенный пар. Давление и упругость паров.

2. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Объясните зависимость давления насыщенных паров от температуры. Приведите график этой зависимости.

3. Уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов. Можно ли перевести системы из одной фазы в другую, минуя двухфазное состояние.

4. Нарисуйте фазовую диаграмму. Тройная точка. Критическая температура.

5. Абсолютная влажность, относительная влажность, точка росы, дефицит влажности. Зависимость их от температуры.

6. Устройство и принцип действия гигрометра Ламбрехта.

7. Устройство и принцип действия психрометра. Психрометрическая таблица. Как будет меняться психрометрическая разность при понижении температуры воздуха, если абсолютная влажность остается неизменной? Какой психрометр – Августа или Ассмана – дает более точные показания? Почему? Завышает или занижает показания психрометр Августа?

4. Литература.

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Наука, 1981.

2. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

Таблица 1.

Давление (упругость) и плотность насыщенного водяного пара при разных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{мм рт.ст.}$	$P_0, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{мм рт.ст.}$	$P_0, \text{г/м}^3$
-1	4,22	4,47	45	71,88	65,4
0	4,58	4,84	50	92,5	83,0
1	4,93	5,22	55	118,0	104,3
2	5,29	5,60	60	149,4	130
3	5,69	5,98	65	187,5	161
4	6,10	6,40	70	233,7	198
5	6,54	6,84	75	289,1	242
6	7,01	7,3	80	355,1	293
7	7,51	7,8	85	433,6	354
8	8,05	8,3	90	525,8	424
9	8,61	8,8	95	633,9	505
10	9,21	9,4	100	760,0	598

t, 0C	P0, мм рт.ст.	P0, г/м3	t, 0C	P0, мм рт.ст.	P0, г/м3
11	9,84	10,0			
12	10,52	10,7			
13	11,23	11,4			
14	11,99	11,4			
15	12,79	12,8			
16	13,63	13,6			
17	14,53	14,5			
18	15,48	15,4			
19	16,48	16,3			
20	17,54	17,3			
21	18,65	18,3			
22	19,83	19,4			
23	21,07	20,6			
24	22,38	21,8			
25	23,76	23,0			
26	25,21	24,4			
27	26,74	25,8			
28	28,35	27,2			
29	30,04	28,7			
30	31,82	30,3			
31	33,70	32,1			
32	35,66	33,9			
33	37,73	35,7			
34	39,90	37,6			
35	42,18	39,6			
36	44,56	41,8			
37	47,07	44,0			
38	49,69	46,3			
39	52,44	48,7			
40	55,32	51,2			

Таблица 2

Психометрическая таблица (для психрометра Ассмана)

Показ. сухого термом.	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C														
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19	16	11
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	35	31	26	23	18	14
3	100	91	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	25	21	17
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28	24	20
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23
6	100	92	85	78	72	68	61	56	50	45	41	35	33	29	25
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28
8	100	93	86	80	74	68	63	58	54	49	45	41	37	33	30
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	38	34
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43	40	36
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38
13	100	94	88	84	78	73	68	63	59	57	53	50	46	43	40
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41

Показ. сухого термом.	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С														
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49	46	43
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	50	47	45
19	100	95	91	85	82	77	74	70	67	63	60	57	54	51	48
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55	53	49
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56	54	51
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57	55	52
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58	56	53
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59	56	53
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59	58	54
26	100	96	92	88	84	81	78	75	72	69	66	63	61	58	56
27	100	96	92	89	85	82	78	75	72	69	67	64	61	59	56
28	100	96	92	89	85	82	79	76	73	70	67	65	62	60	57
29	100	96	93	89	85	83	79	76	73	70	68	65	63	60	58
30	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63	61	58
31	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63	61	58

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы: Изучить тепловое линейное расширение металлов.

В работе используются: цилиндрические образцы, вертикальная печь для нагрева, индикатор часового типа для измерения удлинения, пробирки.

1. Введение.

Твердые тела при изменении температуры изменяют свои геометрические размеры. Для количественной характеристики этого явления вводятся так называемый линейный и объемный коэффициенты теплового расширения, определяемые, соответственно, как

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}; \quad \beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT},$$

где l - длина образца, V - его объем, T - абсолютная температура.

Нетрудно показать, что для изотропного твердого тела имеет место следующая связь между коэффициентами линейного и объемного теплового расширения $\beta = 3\alpha$

Как правило, нагрев вызывает увеличение линейных размеров ($\alpha > 0$), хотя возможно и обратное ($\alpha < 0$). Величина коэффициента теплового расширения зависит главным образом от типа атомов составляющих твердое тело. Физические причины теплового расширения могут быть поняты из анализа простой двухатомной модели твердого тела.

Рассмотрим два атома: пусть один из них закреплен, а другой совершает колебания (имитирующие влияние температуры) в силовом поле первого атома (в определенном смысле аналогом этой модели могут быть два шарика, соеди-

ненные пружиной). При рассмотрении такой модели возможны две ситуации. Первая из них заключается в предположении о том, что сила F , возвращающая каждый атом к положению равновесия пропорциональна смещению, т.е.

$$F = - kx,$$

где x - величина смещения от положения равновесия, k -коэффициент пропорциональности, физический смысл которого будет ясен из дальнейшего.

В этом случае среднее положение атома не будет зависеть от амплитуды колебания. Такие колебания являются симметричными относительно положения равновесия, реализующегося при некотором значении межатомного расстояния $r = r_0$ (рис. 2б).

Потенциальная энергия двух атомов в рамках такого приближения, называемого гармоническим приближением, представляет собой параболу (пунктирная кривая, (рис. 2б) колебания в параболическом потенциале являются гармоническими.

В реальных твердых телах зависимость энергии взаимодействия двух атомов от расстояния является существенно асимметричной и представляет собой результат сложения потенциальной энергии отталкивания атомов $U_{\text{отт.}}$ и потенциальной энергии притяжения $U_{\text{прит.}}$ (рис. 2а). суммарная кривая, являющаяся потенциалом межатомного взаимодействия $U(r)$, показана сплошной линией на рис. 2б.

Как видно, при $r \rightarrow \infty U(r) \rightarrow 0$, что отражает отсутствие взаимодействия при больших межатомных расстояниях. При $r \rightarrow 0 U(r) \rightarrow \infty$, что обусловлено быстрым ростом кулоновского отталкивания атомных ядер при их сближении в области $r = r_0$. Потенциал $U(r)$, показанный сплошной линией на рис. 2б, называется ангармоническим. Колебания атомов в таком потенциале определяют тепловое расширение твердых тел.

Рассмотрим сначала в качественном плане связь ангармонизма потенциала межатомного взаимодействия с тепловым расширением. Для этого проанализируем колебания одного атома. Относительно другого при заданном значении полной энергии (складывающейся из потенциальной и кинетической составляющих).

На рис. 3а различные значения полной энергии изображены горизонтальными линиями W_1, W_2, W_3, \dots . В положении равновесия $r = r_0$ потенциальная энергия минимальна, а кинетическая - максимальна. При смещении атома из положения равновесия кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная растет, достигая максимума при максимальном отклонении от положения равновесия. Величина потенциальной энергии при этом определяется точкой пересечения зависимости $U(r)$ с горизонтальной прямой W . по мере возрастания температуры увеличивается полная энергия атома и растет амплитуда его колебаний. При этом смещение вправо от положения равновесия на рис. 2б из-за ангармонизма потенциала $U(r)$ оказывается больше, чем смещение влево. В результате среднее расстояние между атомами (показанное точками на рис. 3б) становится тем больше, чем больше полная энергия колеблющегося атома. Увеличение среднего расстояния между атомами и означает тепловое расширение тела.

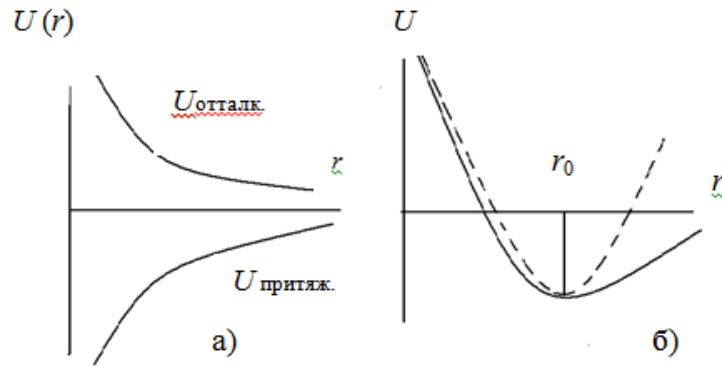


Рис. 2. Потенциальная энергия взаимодействия двух атомов:

- а) $U_{отталкив.}$ – энергия отталкивания, $U_{притяж.}$ – энергия Кулоновского притяжения;
 б) сплошная линия – полная потенциальная энергия взаимодействия с учетом ангармонизма; пунктир – гармоническое приближение,
 r_0 – положение равновесия при $T = 0\text{ K}$

На основании этой простой качественной модели твердого тела можно оценить коэффициент теплового расширения тела. Впервые этот расчет был выполнен Я.И. Френкелем.

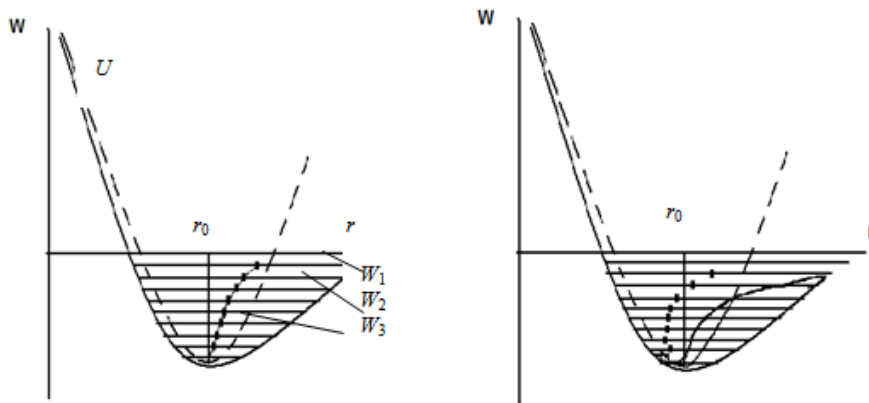


Рис. 3. К пояснению причин теплового расширения.

Точки – смещение положения равновесия при изменении полной энергии; а) – обычный вид кривой $U = f(r)$; в) возможный вид кривой $U(r)$, допускающий отрицательный коэффициент теплового расширения.

Разложим потенциал межатомного взаимодействия $U(r)$ в ряд Тейлора, ограничившись только первыми четырьмя членами:

$$U(r) = U(r_0) + \left(\frac{dU}{dr} \right)_{r=r_0} (r - r_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2U}{dr^2} \right)_{r=r_0} (r - r_0)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{d^3U}{dr^3} \right)_{r=r_0} (r - r_0)^3$$

Пусть $U(r_0) = U_0$;

$$\left(\frac{d^2U}{dr^2} \right)_{r=r_0} = a;$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d^3U}{dr^3} \right)_{r=r_0} = -b \quad r - r_0 = x_0$$

Тогда, учитывая, что $\left(\frac{dU}{dr}\right)_{r=r_0} = 0$ имеем:

$$U(r) = U_0 + \frac{1}{2}ax^2 - \frac{1}{3}bx^3 = U_0 + \Delta U, \quad \text{где} \quad \Delta U = \frac{1}{2}ax^2 - \frac{1}{3}bx^3$$

Величину a называют обычно коэффициентом квазиупругой связи, величину b - коэффициентом ангармоничности.

Сила, действующая на колеблющийся атом со стороны закрепленного атома, равна $F = -\frac{dU}{dx} = -\frac{d(\Delta U)}{dx} = -ax + bx^2$

Из последнего соотношения видно, что в ангармоническом приближении к члену, пропорциональному смещению x из положения равновесия, прибавляется добавка, пропорциональная x^2 , которая приближенно учитывает асимметрию потенциала межатомного взаимодействия. Именно эта добавка, в основном, и определяет тепловое расширение.

Среднее (по периоду колебания) значение силы, действующее на колеблющийся атом, равно нулю:

$$\bar{F} = -a\bar{x} + b\bar{x}^2 = 0$$

Тогда среднее значение смещения из положения равновесия можно определить как $\bar{x} = -\frac{bx}{a}$

Если потенциал межатомного взаимодействия является гармоническим $b=0$, то среднее значение этого смещения будет равно нулю. В случае ангармонического потенциала ($b \neq 0$) величину \bar{x}^2 с достаточно хорошей точностью можно заменить ее значением в гармоническом приближении. Для гармонического приближения

$$\frac{a\bar{x}^2}{2} = \frac{kT}{2},$$

где левый член представляет собой среднюю потенциальную энергию тепловых колебаний напомним при этом, что в молекулярно-кинетической теории утверждается, что на каждую степень свободы приходится энергия равная половине kT , где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

Таким образом,

$$\bar{x} = \frac{b}{a}\bar{x}^2 = \frac{b}{a^3}kT$$

В рамках двухатомной модели коэффициент линейного теплового расширения равен

$$\alpha = \frac{r-r_0}{r_0} \cdot \frac{1}{T} = \frac{\bar{x}}{r_0} \cdot \frac{1}{T}$$

Тогда с учетом (8) имеем

$$\alpha = \frac{k}{r_0} \cdot \frac{b}{a^2}$$

Из (9) видно, что действительно при отсутствии ангармонизма (т.е. при $b=0$) коэффициент теплового расширения равен нулю. Несмотря на простоту рассмотренной двухатомной модели и сделанные предположения, формула (9) дает правильные по порядку величины значения коэффициента линейного теплового расширения.

2. Описание и порядок проведения эксперимента.

Исследуемый образец в виде цилиндрического стержня нагревается в стеклянной пробирке, заполненной водой. Нагрев осуществляется с помощью специального лабораторного прибора. Удлинение образца при нагреве фиксируется индикатором часового типа, укрепленном на поворотном кронштейне прибора.

Порядок эксперимента заключается в следующем.

1. Измерить длину исследуемого образца с помощью штангенциркуля.
2. Заполнить на $3/4$ объема водой пробирку, находящуюся в комплексе принадлежностей прибора. С помощью лабораторного термометра измерить температуру воды. Спустить в пробирку исследуемый образец сферическим концом вниз. Пробирку с образцом установить в прибор.

3. Вставить и закрепить индикатор часового типа в кронштейне, оттянуть шток индикатора вверх, повернуть кронштейн, совместить ось образца с осью индикатора и опустить шток. Зафиксировать кронштейн стопорным винтом.

ВНИМАНИЕ! *Индикатор часового типа является точным механическим прибором, требующим предельно аккуратного обращения.*

4. Запомнить исходное положение стрелки на шкале индикатора.
5. Включить нагреватель прибора.
6. Через некоторое время после закипания воды в пробирке показания индикатора перестанут изменяться. Запомнить положение стрелки индикатора.
7. Выключить нагрев.
8. Рассчитать удлинение образца во время нагрева как разность конечного и исходного показаний прибора. Рассчитать средний коэффициент линейного теплового расширения.

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{(373 - T_B)},$$

где l_0 - исходная длина образца, Δl – удлинение при нагреве, T_B – температура воды в пробирке до нагрева.

9. Осторожно извлечь пробирку из прибора, удалить образец и через некоторое время вновь заполнить пробирку холодной водой.

10. Повторить опыт еще два раза.

11. Трижды произвести измерение коэффициента линейного теплового расширения для другого образца. Эксперименты удобно проводить, заполняя следующую таблицу.

№ опыта	материал образца	l_0 ,	T_B , K	Δl , мкм	α , K^{-1} K^{-1}

12. Рассчитать для каждого образца систематические относительные и абсолютные ошибки измерений.

3. Контрольные вопросы.

1. Физическая природа теплового расширения.
2. Вывести формулу (7)
3. Чек обусловлен отрицательный коэффициент теплового расширения.
4. Зависит ли модуль Юнга твердого тела от напряжения, а) в гармоническом приближении; б) в ангармоническом приближении.
5. Оценить величину коэффициента теплового расширения по формуле (9), Для оценки можно использовать следующие параметры. Частота колебаний атомов в твердых телах $\omega_0 \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$, масса атома $m \approx 10^{-27} \text{ кг}$, коэффициент ангармоничности $b \approx 10^6 \text{ Па}$.
6. Доказать соотношение(9).
7. Как, в качественном смысле, зависит коэффициент теплового расширения, от температуры во всем температурном интервале существования твердого тела.
8. Критерий Линдемана. Оценка коэффициента линейного теплового расширения по температуре плавления твердого тела.

4. Литература.

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела / Г.И. Епифанов. – М. : Высшая школа, 1977. – 298 с.
2. Лившиц В.Г. Физические свойства металлов и сплавов / В.Г Лившиц, В.С Крапошин, Я.Л Линецкий. – М. : Металлургия, 1980. – 319 с.
3. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел / С.И. Новикова. – М. : Наука, 1974. – 291 с.
4. Павлов П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – М. : Высшая школа, 1985. – 383 с.
5. Энциклопедия. – Т.2. – М. : Советская энциклопедия, 1990. – 703 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: измерить коэффициенты внутреннего трения касторового и вазелинового масел.

В работе используются: стеклянный цилиндр с шкалой на боковой поверхности, металлические шарики, касторовое и вазелиновое масло, секундомер, термометр.

1. Введение.

Если некоторая часть жидкости приведена в движение и если нет силы, поддерживающей это движение, то оно быстро прекратится. Происходит это потому, что при перемещении одних слоев жидкости относительно других возникают силы трения. Со стороны слоя движущегося более быстро, на слой

движущейся медленнее, действует ускоряющая сила. Наоборот, со стороны слоя движущегося медленнее на более быстрый слой действует задерживающая сила. Это свойство жидкости, связанное с наличием сил внутреннего трения называется **вязкость**. Подобное явление проявляется не только в жидкостях, но и во всех телах при всех агрегатных состояниях.

Тормозящая сила, возникающая при взаимодействии двух перемещающихся относительно друг друга слоев жидкости и направленная по касательной к поверхности слоев носит название **силы внутреннего трения**.

Установлено, что величина данной силы тем больше, чем больше площадь поверхности ΔS слоя, который мы рассматриваем и зависит от того, насколько быстро меняется скорость движения при переходе от одного слоя жидкости к другому.

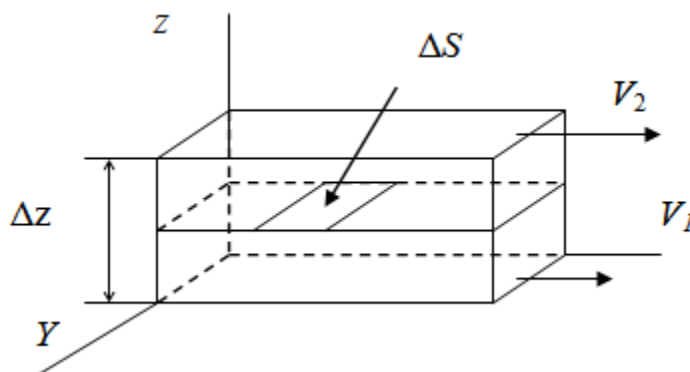


Рис. 1.

Если два слоя (рис. 1), отстоящие друга на расстоянии ΔZ , поверхность соприкосновения которых равна ΔS , текут со скоростями V_1 и V_2 то сила внутреннего трения определяется формулой:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta z} \Delta S \quad (1)$$

Здесь $\Delta v = v_1 - v_2$, а $\frac{\Delta v}{\Delta z}$ обозначается так называемый градиент скорости, т.к. величину изменения скорости Δv на каждую единицу длины Δz в направлении, перпендикулярном к направлению движения. Величина η , зависящая от природы жидкости и от температуры, называется **коэффициентом внутреннего трения** или коэффициентом вязкости.

Из формулы (1) находим, что $\eta = \frac{F}{\Delta S \frac{\Delta v}{\Delta z}}$ Отсюда размерность коэффициента

внутреннего трения в системе СГС равна $[\eta] = \text{см}^{-1} \text{сек.}^{-1} \text{г.}$ в СИ $[\eta] = \text{м}^{-1} \text{кгсек}^{-1} \text{м}^{-1} \text{кг сек.}^{-1}$

Из этой же формулы мы видим, что коэффициент вязкости численно равен силе, которая действует на единицу поверхности двух слоев, движущихся с различными скоростями, при условии, что градиент скорости равен единице.

Единицей коэффициента внутреннего трения в системе СГС служит пуаз, который обозначается символом «П», в честь французского физика Пуазейля.

Вязкость жидкостей весьма сильно зависит от температуры, при этом она уменьшается с повышением температуры.

Так, вязкость воды при 0°C равна $\eta_0^{\circ} = 0,018$ г см сек., а при 90°C равна $\eta_{90^{\circ}} = 0,003$ г см сек. Особенно сильно зависит от температуры вязкость масел.

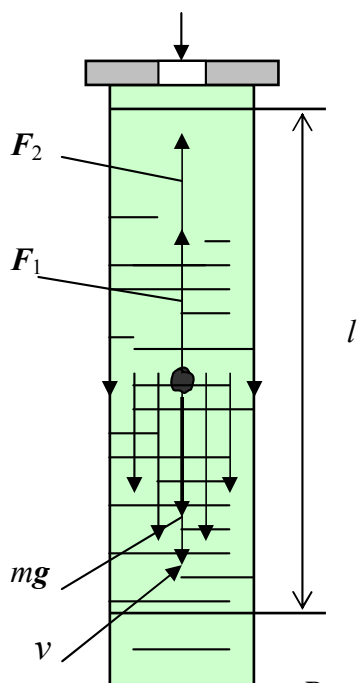


Рис. 2.

2. Описание и порядок проведения работы.

Для определения коэффициента вязкости жидких и газообразных тел могут быть применимы разнообразные методы и приборы. В данной работе используется метод Стокса, который основан на измерении скорости падения тяжелого шарика в исследуемой жидкости. Прибор (Рис. 2), применяемый для этих измерений представляет собой стеклянный цилиндр на боковой поверхности которого нанесена вертикальная шкала.

Сосуд заполняется исследуемой жидкостью. В цилиндр по его оси через отверстие сверху сбрасываются небольшие металлические шарики, поочередно 2-3 штуки. Жидкость в цилиндре поддерживается при постоянной температуре, которая измеряется термометром.

При падении внутри жидкости шарик встречает сопротивление, которое обуславливается вязкостью жидкости. Это следует из того, что слой жидкости, непосредственно прилегающей к поверхности шарика, движется вместе с ним, как бы прилипает к нему и силы сопротивления возникают вследствие трения между слоями жидкости. На шарик при падении внутри жидкости действует три силы:

$$1. \text{ Сила тяжести } P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 \quad P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g \quad (3)$$

$$2. \text{ Архимедова сила } F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g \quad F_1 = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_2 g \quad (4)$$

3. Сила сопротивления F_2 , которая, как показал Стокс, при условии движения маленького шарика с малой скоростью падения равна:

$$F_2 = 6\pi\eta r v \quad (5)$$

где ρ_1 – плотность шарика, r – радиус шарика, ρ_2 – плотность жидкости, η – коэффициент вязкости жидкости, v – скорость падения шарика в жидкости.

Из формулы (3) и (4) видно, что ни P , ни F_1 не зависит от скорости движения шарика, а сила $F_2(v)$, наоборот, пропорциональна этой скорости.

Таким образом, в начальный момент движения шарика, когда его скорость постепенно возрастает, увеличивается и сила сопротивления F_2 . Но в тот момент, когда дальнейшее движение шарика вниз будет происходить равномерно со скоростью $v = \text{const}$, сила F_2 будет постоянной.

Это хорошо видно по рис. 3, где представлена кривая зависимости скорости падения шарика в вязкой среде от времени. Ход кривой показывает, что уже через некоторое время скорость движения становится постоянной и равной F .

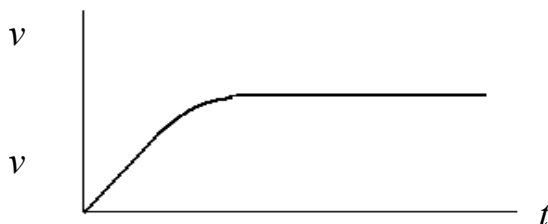


Рис. 3.

Приравнивая силы mg и $F_1 + F_2$ – получим, что:

$$\frac{4}{3}\pi r^2 \rho_1 g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 g + 6\pi\eta r v \quad (6)$$

Откуда коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{v} \quad (7)$$

Если уровень жидкости в цилиндре «А» располагается достаточно высоко от заданной верхней метки n , то можно считать, что шарик начинает двигаться равномерно от этой метки до m и расстояние l между двумя метками проходит с постоянной скоростью $V_0 = \frac{l}{t}$, где t – время, в течение которого шарик проходит расстояние. Отсюда:

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_1 - \rho_2}{v}, \quad \eta = \frac{2}{9} r^2 g t \frac{\rho_1 - \rho_2}{l} \quad (8)$$

Эта формула и служит для определения коэффициента вязкости жидкости данным методом.

Нужно отметить, что вышеприведенная формула (8) будет справедлива лишь при выполнении ряда условий.

Уравнение Стокса (5) выводится в предположении, что, во-первых, движение жидкости носит ламинарный, а не турбулентный (вихревой) характер; во-вторых, жидкость во всех направлениях простирается безгранично, т.е. во всех бесконечно удаленных точках жидкости остается в покое.

Из первого условия следует, что скорость шарика должна быть невелика, а это возможно лишь для шариков небольших размеров.

Второе условие требует, чтобы размеры сосуда, в котором находится жидкость, были велики по сравнению с размерами шарика. С другой стороны, при проведении опыта необходимо поддерживать постоянную температуру исследуемой жидкости. Это необходимо по двум причинам:

1. Вязкость жидкости сильно зависит от температуры;
2. При резких колебаниях температуры в жидкости возникают конвекционные потоки, которые при малых скоростях падения шарика могут внести большие ошибки при измерениях.

Порядок проведения работы.

1. Подготовить металлические шарики, микрометр, секундомер. Микрометром произвести измерения 2–3 шариков (их диаметр). Определить радиус.

2. Определить температуру исследуемой жидкости или температуру среды, в которой находится жидкость.

3. Опустить шарик в исследуемую жидкость, определить скорость его падения. Для этого измеряют секундомером время, в течение которого шарик проходит расстояние между двумя метками в цилиндре.

4. По формуле (8) определяют коэффициент вязкости для каждого шарика и определяют среднее значение.

Некоторые данные плотности тел:

1. Касторовое масло при $15^{\circ}\text{C} - 0,97\text{г/см}^3$; $15^{\circ}\text{C} - 0,97\text{г/см}^3$; $0,97 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

2. Вазелиновое масло $0,87 \text{ г/см}^3$; $0,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 0,87\text{г/см}^3$

3. Сталь $7,7 \text{ г/см}^3 - 7,8\text{г/см}^3$; $7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

4. Свинец $11,34 \text{ г/см}^3 - 11,3\text{г/см}^3$; $11,34 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

5. Уран $18,7 \text{ г/см}^3$; $18,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

6. Углерод (графит) $2,22 \text{ г/см}^3$; $2,22 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

(алмаз) $3,514 \text{ г/см}^3$; $3,514 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

3. Контрольные вопросы.

1. Что называют внутренним трением?

2. Каков физический смысл коэффициента вязкости?

3. Какие силы действуют на шарик в вязкой среде?

4. Каковы условия выполнения закона Стокса?

5. Какое движение жидкости называется ламинарным, турбулентным?

6. Как изменяется скорость шарика с изменением его радиуса?

7. Почему верхняя метка расположена ниже уровня жидкости в цилиндре?

8. Каковы единицы измерения коэффициента вязкости?

9. Как физически объяснить возникновение силы трения и какими величинами она определяется?

4. Литература.

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Наука, 1981.

2. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Цель работы: изучить принцип действия и устройство холодильной машины. Определить хладопроизводительность, холодильный коэффициент и коэффициент рабочего времени холодильника.

Приборы и принадлежности: холодильник, технические весы, секундомер, металлический сосуд, мерный стакан, вода, термометр.

1. Введение.

Применение низких температур получило широкое распространение в промышленности и в быту, в частности, в холодильных машинах. В основу действия холодильных машин положен обратный цикл Карно. Цикл Карно (рис. 1) представляет собой круговой процесс, состоящий из двух адиабат АД, ВС и двух изотерм АВ, DC. Для осуществления цикла нужно иметь внешнее по отношению к рабочему телу (газ фреон, хладон) более горячее тело – нагреватель – с температурой T_1 и более холодное тело – холодильник – с температурой T_2 (рис. 2).

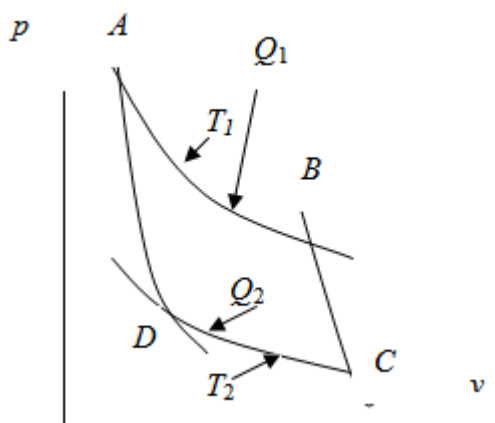


Рис. 1.

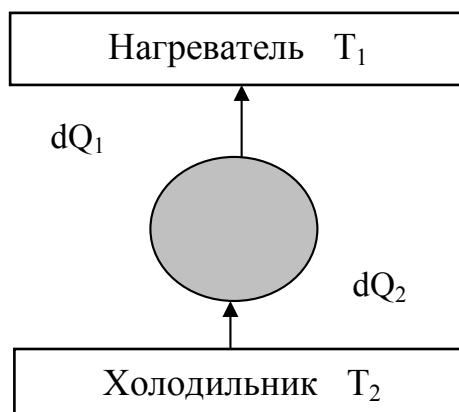


Рис. 2

Цикл Карно – это обратимый процесс: протекающий по часовой стрелке процесс называется прямым, против часовой стрелки – обратным. Рассмотрим эти процессы.

В случае прямого процесса при расширении рабочего тела по АВ для поддержания постоянной температуры (т.к. при расширении газ охлаждается) необходим подвод теплоты от нагревателя (dQ_1). В случае же сжатия тела по CD для поддержания температуры T_2 тело вынуждено отдавать теплоту холодильнику (dQ_2).

В случае обратного цикла рабочее тело отбирает теплоту от холодильника и отдает ее нагревателю. Таким образом, результат обратного цикла состоит в том, что тело с меньшей температурой, от которого отбирается теплота, охлаждается, а тело с большей температурой, которому отдается теплота от рабочего тела - нагревается. Машины, работающие по обратному циклу, называются холодильными машинами.

В соответствии с I началом термодинамики количество теплоты dQ , введенное в систему, идет как на изменение внутренней энергии dU , так и на совершение данной системой работы dA против внешних сил:

$$dQ = dA + dU \quad (1)$$

Если в циклическом обратимом процессе рабочее тело после совершения цикла возвращается в исходное состояние (например, в точку А на рис 1), то приращение $dU = 0$, т.к. внутренняя энергия является функцией состояния системы, а оно не изменилось. Следовательно, для случая циклического процесса выражение (1) примет вид:

$$\int dQ = \int dA \quad Q_1 - Q_2 = A; \quad Q_1 = Q_2 + A; \quad (2)$$

т.е. теплота Q_1 , полученная от нагревателя, идет на совершение данной системой работы A и передачу холодильнику некоторого количества теплоты Q_2 . Такие циклы, в которых теплота превращается в работу, называют прямыми.

Если же работа A совершается над системой (обратный цикл), то она сопровождается отводом от рабочего тела эквивалентного работе количества теплоты, и некоторое количество теплоты Q_2 берется от тела с более низкой температурой - холодильника (рис.2). Суммарное количество теплоты Q_1 передается нагревателю:

$$Q_1 = Q_2 + A \quad (3)$$

В обратном цикле за счет работы внешних сил система отдает количество теплоты большее, чем она получает извне в ходе цикла. Тем самым обратный цикл позволяет за счет работы, совершаемой внешними силами, перевести некоторое количество теплоты от менее нагретого тела к более нагретому телу. Следствием этого является еще большее охлаждение холодного тела.

Экономичность холодильника определяется холодильным коэффициентом ε , равным отношению количества отобранного от холодильника теплоты к совершаемой работе:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} \quad (4)$$

Холодильный коэффициент показывает, какое количество теплоты отнимается от охлажденного тела при совершении единичной работы.

Другой, важной для практических целей, характеристикой холодильной машины является ее хладопроизводительность, характеризующая количество теплоты, отнимаемое от охлаждаемого тела (холодильника) за единицу времени, т.е. скорость охлаждения

$$q = \frac{Q_2}{t} \quad (5)$$

В технике хладопроизводительность измеряется в Дж/час.

Третьей характеристикой холодильной машины является коэффициент рабочего времени, характеризующий отношение промежутка времени работы компрессора над рабочим телом t_1 к промежутку паузы t_2 , когда электродвигатель (и компрессор) отключен:

$$k = \frac{t_1}{t_2} \quad (6)$$

t_1 – раб., t_2 – пауза.

Для измерения количества теплоты Q_2 , отнимаемого от охлаждаемого тела, можно поместить в холодильную камеру металлический сосуд с водой, определив предварительно массу сосуда m_1 и массу воды m_2 . Включив в сеть электродвигатель компрессора на некоторое время t и зная потребляемую мощность электродвигателя ($W = 140$ Вт), можно определить затрачиваемую работу A :

$$A = Wt \quad (7)$$

Измерив понижение температуры воды, можно определить количество теплоты, отнятое у воды и металлического сосуда:

$$Q_2 = c_1 m_1 \Delta T + c_2 m_2 \Delta T \quad (8)$$

Значение удельных теплоемкостей металла c_1 и воды c_2 находят из справочных таблиц. По найденным значениям A , Q_2 и t работы холодильника вычисляют холодильный коэффициент ε и хладопроизводительность q холодильника.

2. Описание и порядок проведения эксперимента.

В качестве экспериментальной установки используется бытовой холодильник. Холодильник выполнен в виде металлического шкафа, внутри которого помещается холодильная камера. Между стенками шкафа и камерой находится теплоизоляционный слой. Охлаждение холодильной камерой производится холодильным агрегатом (рис. 3.)

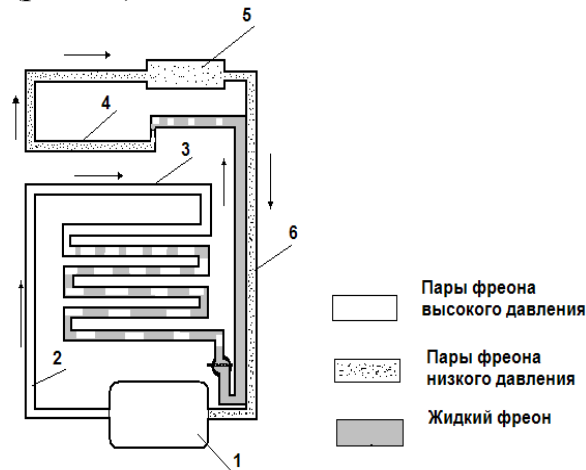


Рис. 3.

Компрессор 1 засасывает пар фреона II, сжимает его до нескольких атмосфер и нагнетает в конденсатор 2. В процессе сжатия пар фреона нагревается до 30- 40⁰ С ("адиабатический" процесс). Проходя по трубкам конденсатора, пар охлаждается до температуры окружающей среды и конденсируется ("изотермический" процесс). Жидкий хладагент через капиллярную трубку 3, имеющую небольшое сечение, поступает в испаритель 4. Сечение трубок испарителя гораздо больше, чем сечение капиллярной трубки, поэтому давление фреона в испарителе резко падает ("адиабатический" процесс) и температура понижается до минус 8- 10⁰С. При испарении фреона происходит отбор тепла от стенок испарителя и соприкасающегося с ним воздуха. Затем пар фреона по трубопроводу возвращается в компрессор, и процесс повторяется.

На работу компрессора, связанную с переносом и изменением агрегатных состояний рабочей жидкости, затрачивается энергия, потребляемая электродвигателем.

Дополнительно в холодильную машину вводится система защиты двигателя от перегрузки - тепловое реле, которое отключает двигатель при достижении заданной минимальной температуры. Агрегат включится, когда тепловое реле зафиксирует превышение заданной максимальной температуры

Порядок выполнения работы.

1. Определите массу сосуда взвешиванием и налейте в него определенный объем воды. Измерьте начальную температуру воды в сосуде (латунь 140г, вода 200г).

2. Поставьте сосуд с водой в испаритель (холодильная камера) и включите электродвигатель компрессора, одновременно начните отсчет времени.

3. Через 20 минут определите температуру воды в сосуде.

4. Предполагая, что количество теплоты, отнимаемое из воздуха в шкафу холодильника, мало, но сравнимо с количеством теплоты, отнимаемым от сосуда с водой, определите холодильный коэффициент хладопроизводительность холодильника.

5. Определите с помощью секундомера время работы двигателя и промежуток времени, когда двигатель автоматически отключается от сети. Рассчитайте коэффициент рабочего времени.

3. Контрольные вопросы.

1. Какой процесс называется циклическим? Применение первого начала термодинамики для циклического процесса.

2. Как изменится энтропия рабочего тела в адиабатическом и изотермическом процессе? Нарисуйте качественный график изменения энтропии для цикла Карно.

3. Объясните принцип работы тепловых и холодильных машин.

4. Определите работу в адиабатическом и изотермическом процессах.

5. Определите теплоту, получаемую или отдаваемую рабочим телом в изотермическом процессах.

6. Расскажите о работе холодильной машины, об устройстве и принципе действия её основных частей.

4. Литература.

1. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М. : Наука, 1976, С. 241–302.

2 Матвеев А. Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1981, С. 152–164.

3. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Цель работы: определить коэффициент теплопроводности плохих проводников тепла.

В работе используются: калориметр, термометр, секундомер, технические весы, плохие проводники тепла.

1. Введение.

Во всяком неравномерно нагретом теле происходит перенос некоторого количества теплоты от более нагретых его участков к менее нагретым. Если эта передача не сопровождается переносом вещества, то процесс носит название *теплопроводности*.

Молекулярно-кинетическая теория вещества объясняет этот процесс следующим образом. Так как температура является мерой средней кинетической энергии молекул, то различие температур двух участков свидетельствует о том, что кинетическая энергия молекул этих участков различна. Поэтому молекулы соприкасающихся слоев передают при столкновениях свою кинетическую энергию из слоя в слой.

Если процесс стационарный и температура меняется от слоя к слою равномерно, то количество теплоты, передаваемое через слой вещества толщиной x за время dt , выражается зависимостью:

$$dQ = k \frac{T_1 - T_2}{x} S dt \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности,

$T_1 - T_2$ – разность температур между слоями толщиной x ,

S – площадь поперечного сечения слоя.

Величина $\frac{T_1 - T_2}{x}$ представляет собой изменение температуры, приходящееся на единицу длины в направлении передачи теплоты, и называется градиентом температуры.

Полагая $S = 1$, $\frac{T_1 - T_2}{x} = 1$, имеем $Q = k$, т.е. коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, которое проходит через площадку, перпендикулярную к потоку теплоты, за единицу времени при градиенте температуры равном единице. Строго говоря, коэффициент теплопроводности зависит от температуры, но для небольших интервалов температуры его можно считать постоянным.

Если теплота передается от более нагретой среды, температура которой T_1 поддерживается постоянной, к менее нагретой через исследуемый слой толщиной x , то температура второй среды будет повышаться. В случае отсутствия теплопередачи со стороны второй среды количество теплоты, прошедшее через исследуемый слой, можно определить калориметрически:

$$dQ = mcdT, \quad (2)$$

где m и c – масса и удельная теплоемкость второй среды.

Сравнивая выражения (1) и (2), получим:

$$mcdT = \frac{kS}{x} (T_1 - T_2) dt$$

Откуда

$$mcx \frac{dT}{T_1 - T_2} = kS dt \quad (3)$$

Если температура второй среды изменилась за время τ от T_0 до T , то значение коэффициента теплопроводности можно получить интегрированием уравнения (3):

$$mcx \int_{T_0}^T \frac{dT}{T_1 - T_2} = kS \int_0^\tau dt, \quad mcx \ln \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T} = kS\tau$$

$$k = \frac{mcx}{S\tau} \ln \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T} \quad (4)$$

Таким образом, определение коэффициента теплопроводности сводится к определению изменения температуры второй среды за определенный промежуток времени.

Если в качестве второй среды взять воду в калориметре (c_1, m_1, c_2, m_2) – соответственно теплоемкости и массы воды и пустого калориметра с мешалкой), то формула (4) принимает вид:

$$k = \frac{(m_1c_1 + m_2c_2)x}{S\tau} \ln \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T} \quad (5)$$

Первой средой является пар, температура которого T_1 равна примерно 100°C ($98 \div 99^\circ\text{C}$)

2. Описание и порядок проведения эксперимента.

Установка для опытного определения коэффициента теплопроводности представлена на рис. 1.

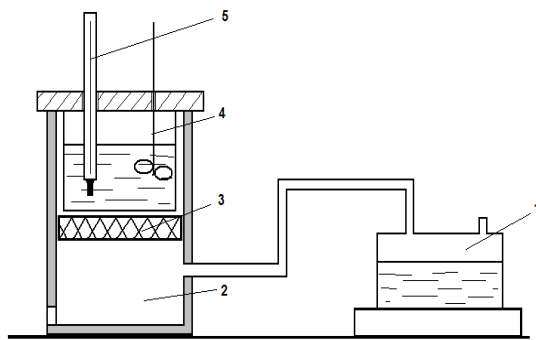


Рис. 1.

Пар от кипятильника 1 через трубку непрерывно поступает в сосуд 2, благодаря чему температура стенок сосуда остается постоянной и равно примерно $T_1 = 100^\circ\text{C}$.

На верхнюю крышку сосуда 2 кладется диск 3 из исследуемого материала, а сверху диска устанавливается калориметр 4 с водой. Таким образом, сосуд 1 с диском 2 образуют нагреватель для калориметра 3. В калориметр вставляется термометр 5.

Зная толщину x и площадь слоя исследуемого вещества S , температуру воды T_0 до нагревания, температуру T после истечения срока времени τ с начала нагревания, можно определить коэффициент теплопроводности.

Выполнение работы.

1. Взвешиванием на технических весах определите массу пустого калориметра с мешалкой, а затем массу воды в нем.

2. Измерьте штангенциркулем толщину и диаметр исследуемого образца и вычислите его площадь.

3. Соберите установку согласно рис. 1.
4. Включите кипятильник.
5. Когда из трубки начнет идти пар, запишите начальную температуру T_0 , одновременно запустите секундомер.
6. Через $\tau = 20$ мин. Запишите конечную температуру T .
(В процессе измерения воду непрерывно помешивайте мешалкой).
7. Полученные данные занесите в таблицу и затем по формуле (5) определите коэффициент теплопроводности. Расчет производят в системе СИ.
8. Повторите опыт для двух исследуемых образцов.
9. Оцените возможные источники погрешности метода.

3. Контрольные вопросы.

1. Какие процессы в газах объединяются понятием Явления переноса.
2. В чем сущность явления теплопроводности? Запишите уравнение теплопроводности (Фурье).
3. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? Какими двумя формулами он определяется?
4. От каких параметров газа зависит коэффициент диффузии D , коэффициент внутреннего трения (динамической вязкости) η , коэффициент теплопроводности k ? Какова каждая из этих зависимостей?
5. Какова теоретическая связь между коэффициентами переноса D , η , k ? полностью ли она подтверждается экспериментально?
6. Каковы коэффициенты теплопроводности в жидкостях, в твердых телах? Можно ли провести параллель между явлениями переноса и конвекцией?
7. Чем объясняется хорошая теплопроводность металлов?
8. Будут ли происходить явления переноса в вакууме? Опишите физическую картину и зависимость коэффициентов переноса от давления в области вакуума.
9. В каких приборах используется зависимость коэффициента внутреннего трения η и коэффициента теплопроводности k от давления в вакууме?
10. Для чего в термосах и сосудах Дьюара делают двойные стенки?

4. Литература.

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1981
2. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.
3. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. –Т. 1. – М. : ООО "АСТ", 2001.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

Цель работы: определение приращения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере плавления олова.

В работе используются: тигельная печь, тигель с оловом, термопара, латунный сосуд с маслом, милливольтметр, градуированный график термопары, секундомер.

1. Введение

Фазовый переход первого рода - фазовое превращение, сопровождающееся поглощением или выделением некоторого количества теплоты и изменением удельного объёма; температура перехода остается постоянной и зависит от давления. В данной работе необходимо измерить температуру фазового перехода – температуру плавления олова, что позволит определить приращение энтропии

$$dS = \frac{dQ}{T},$$

а изменение энтропии при переходе системы из состояния а в состояние б

$$\Delta S = \int_a^b \frac{dQ}{T},$$

то измерение энтропии при нагревании и плавлении олова определяется как сумма изменения энтропии при нагревании до температуры плавления и при плавлении олова:

$$\Delta S = \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{dQ}{T} + \int_1^2 \frac{dQ_2}{T} = \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{cm dT}{T} + \frac{\lambda_m}{T_{\Pi}},$$

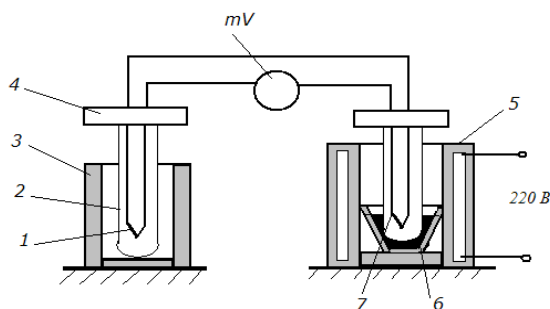
или

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{\Pi}}{T_K} + \frac{\lambda m}{T_{\Pi}},$$

где dQ - бесконечно малое количество теплоты, передаваемой системе при температуре T ; dQ_1 и dQ_2 – бесконечно малые количества теплоты, полученные оловом при нагревании и при плавлении; T_K -комнатная температура; T_{Π} -температура плавления; λ - удельная теплота плавления; c -удельная теплоёмкость; m - масса.

2. Описание установки и порядок проведения эксперимента

Рабочая схема установки показана на рисунке.



В данной работе температура олова измеряется при помощи термопары медь-константа. Один спай термопары 7 погружают в тигель с оловом 6, который помещают в тигельную печь 5, другой спай 1 - в латунный сосуд с маслом 3, в котором практически сохраняется комнатная температура. Концы термопары находятся в стеклянных трубочках 2, которые вставляют в держатели из текстолита 4. Термо-э.д.с., возникающая в цепи термопары, при наличии разности температур в спаих, измеряется милливольтметром.

Задание: Снятие зависимости температуры нагрева олова от времени и определение температуры плавления олова.

1. Измерить начальную температуру при помощи комнатного термометра.
2. Включить одновременно цепь печи и секундомер, отмечая показания милливольтметра через каждую минуту. Результаты измерений отмечать на графике в координатах "показания милливольтметра - время". Измерения проводить до тех пор, пока термо-э.д.с. не достигнет постоянной величины (T_n), а затем начнёт увеличиваться.
3. Выключить цепь печи и проводить аналогичные измерения при охлаждении олова, отмечая показания милливольтметра на графике, что и в п.2.
4. По двум полученным кривым определить показания милливольтметра, соответствующие участкам кривых, параллельным оси времени, и по среднему значению найти термопару плавления олова, используя градуировочный график данной термопары.
5. Вычислить приращение энтропии при нагревании и плавлении олова по формуле (1); масса олова задана, а удельную теплоту плавления и удельную теплоёмкость олова найти в соответствующих таблицах.
6. Определить основные источники погрешности при определении приращения энтропии данным методом

Литература.

- 1 Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М. : Наука, 1981.
2. Савельев И.В. Курс общей физики : в 5 кн. / И.В. Савельев. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – М. : Наука, 2000.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. / Д.В. Сивухин. – Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 2001.

ПРИМЕРНЫЕ ТЕСТЫ

Основы молекулярно – кинетической теории идеального газа.

1. Сосуд с теплонепроницаемыми стенками, содержащий идеальный газ при некоторой температуре, движется с известной постоянной скоростью и затем внезапно останавливается. Как изменится давление в сосуде?
 - 1) уменьшится;
 - 2) увеличится;
 - 3) останется без изменения;
 - 4) станет равным нулю.
2. Газ расширяется по изотермическому закону. Какова его молярная теплоёмкость в этом процессе?

1) равна нулю; 2) равна $+\infty$; 3) равна $-\infty$; 4) равна $3R$.

3. Каково давление жидкости под бесконечной прямой цилиндрической поверхностью (давление Лапласа)?

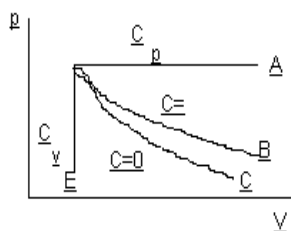
1) $p = \frac{2\alpha}{R}$; 2) $p = \frac{\Delta E}{\Delta SR}$; 3) $p = \frac{F}{lR}$; 4) $p = \frac{\alpha}{R}$

4. Как средняя длина свободного пробега молекул зависит от давления?

- 1) не зависит;
- 2) прямо пропорционально;
- 3) обратно пропорционально;
- 4) нет правильного ответа.

5. Отношение числа молекул гелия к числу молекул кислорода (массы одинаковы) будет равно:

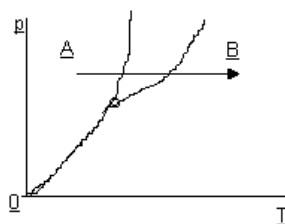
- 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4.



6. Выделите из предложенных графиков изотермический процесс.

- 1) A; 2) B; 3) C; 4) E.

Основы термодинамики.



1. Обычно нас интересует изменение энтропии при протекании какого либо процесса.

Как изменится энтропия в процессе А – В?

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) останется без изменения
- 4) будет равна нулю

2. Какой физический смысл имеет универсальная газовая постоянная в уравнении Майера?

- 1) скорости;
- 2) ускорения;
- 3) силы;
- 4) работы.

3. Полезная работа в прямом идеальном цикле Карно определяется (Q_1 и Q_2 количество теплоты):

- 1) $Q_1 + Q_2$;
- 2) $Q_1 - Q_2$;

- 3) Q_1/Q_2 ;
 - 4) $Q_1/Q_2 - 1$.
4. Энтропия системы в адиабатном необратимом процессе:
- 1) уменьшается;
 - 2) остается без изменения;
 - 3) возрастает;
 - 4) стремится к нулю.

5. Как изменяется давление с температурой в диаграмме состояния, описывающем переход льда в воду (уравнение Клапейрона – Клаузиуса)

$$1) \frac{dp}{dT} \geq 0 \quad 2) \frac{dp}{dT} = 0 \quad 3) \frac{dp}{dT} < 0 \quad 4) \frac{dp}{dT} \rightarrow 0$$

Реальные газы, жидкость и твердое тело.

1. Физический смысл критического состояния реального газа это когда
 - 1) Энергия молекул больше энергии потенциальной ямы;
 - 2) энергия молекул меньше энергии потенциальной ямы;
 - 3) энергия молекул равна энергии потенциальной ямы;
 - 4) энергия потенциальной ямы равна нулю.
2. Теплоемкость твердого тела выше температуры Дебая является ли функцией температуры?
 - 1) да; 2) равно $3R$; 3) равно $6R$; 4) нет правильного ответа
3. Выберите процесс не относящийся к фазовым переходам первого рода:
 - 1) плавление;
 - 2) переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное;
 - 3) кипение;
 - 4) отвердевание.
4. Газ можно превратить в твердое тело, если:
 - 1) энергия теплового движения молекул сравнима с их потенциальной энергией;
 - 2) тепловая энергия молекул больше отрицательной энергии потенциальной ямы;
 - 3) тепловая энергия будет довольно значительно меньше энергии потенциальной ямы;
 - 4) нет правильного ответа.
5. В чем заключается причина анизотропии твердых кристаллических тел?
 - 1) малым расстоянием между атомами;
 - 2) наличием дальнего порядка;
 - 3) ангармонизмом колебаний атомов;
 - 4) внешними условиями.
6. Статистика Ферми – Дирака применима к:
 - 1) фотонам;
 - 2) электронам;
 - 3) молекулам в силовом поле;
 - 4) не применима в данных случаях.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1.	
Проверка основных точек жидкостного термометра	14
Лабораторная работа № 2.	
Измерение атмосферного давления	17
Лабораторная работа № 3.	
Определение длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул газа	21
Лабораторная работа № 4.	
Определение размеров молекул масла	24
Лабораторная работа № 5.	
Определение C_p/C_v методом Клемана и Дезорма	27
Лабораторная работа № 6.	
Определение абсолютной и относительной влажности воздуха	33
Лабораторная работа № 7.	
Определение коэффициента теплового расширения твердых тел	41
Лабораторная работа № 8.	
Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса	46
Лабораторная работа № 9.	
Холодильные машины	50
Лабораторная работа № 10.	
Определение коэффициента теплопроводности	54
Лабораторная работа № 11.	
Определение изменения энтропии при нагревании и плавлении олова	58
Примерные тесты	59

Учебное издание

КОРОТАЕВ Евгений Алексеевич,
ЕРЕМИН Владимир Сергеевич,
МОЧАЛОВА Валентина Ивановна

**ОБЩАЯ ФИЗИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ**

*Учебно-методическое пособие
для студентов II курса физико-математического факультета*

Изготовление оригинала-макета: *Ю.С. Топоркова*

Налоговая льгота – общероссийский классификатор
продукции ОК-005-93, том 2; 953000 – книги, брошюры

Подписано в печать 16.12.2011. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага газетная.
Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 4. Уч.-изд. л. 3,72.
Заказ 230. Тираж 50 экз.

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный педагогический университет».
Отпечатано в типографии университета.
394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (473) 2-55-58-32, 2-55-61-83.

