

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
(КБГУ)

Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП
Р.Ш. Тешев

«12» февраля 2025 г.

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Б1.О.06.02 «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»

Специальность

11.05.01 Радиозлектронные системы и комплексы

Специализация

Радиозлектронные системы передачи информации

Квалификация (степень) выпускника

Инженер

Форма обучения

Очная

Нальчик 2025

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Таблица 1

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУН)
<p>ОПК-2. Способен выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и применять соответствующий физико-математический аппарат для их формализации, анализа и принятия решения.</p>	<p>ОПК-2.1. Способен оперировать научными фактами, опираясь на законы логики</p> <p>ОПК-2.2. Способен осознанно выбирать методы и средства изучения объектов и проблем.</p> <p>ОПК-2.3 Способен применять современные достижения компьютерных технологий для решения практических задач.</p>	<p>Знать современное состояние области профессиональной деятельности.</p> <p>Уметь искать и представлять актуальную информацию о состоянии предметной области</p> <p>Владеть навыками работы за персональным компьютером, в т.ч. пакетами прикладных программ для разработки и представления документации.</p>
<p>ОПК-4. Способен проводить экспериментальные исследования и владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных данных.</p>	<p>ОПК-4.1. Способен применять современные методы, средства и оборудование для проведения экспериментальных исследований.</p> <p>ОПК-4.2. Способен анализировать и обобщать данные, получаемые в результате экспериментов.</p> <p>ОПК-4.3. Способен объективно оценивать полученные результаты экспериментальных исследований и погрешности результатов измерений.</p>	<p>Знать основные методы и средства проведения экспериментальных исследований, системы стандартизации и сертификации.</p> <p>Уметь выбирать способы и средства измерений и проводить экспериментальные исследования.</p> <p>Владеть способами обработки и представления полученных данных и оценки погрешности результатов измерений.</p>

2. Шкала оценивания планируемых результатов обучения

2.1 Текущий контроль

Оценка результатов текущей успеваемости в рамках контрольных точек осуществляется посредством 70-балльной системы, при этом за добросовестное посещение занятий обучающийся может набрать до 10 баллов, за качественное прохождение оценочных мероприятий - до 60 баллов.

Карта распределения рейтинговых баллов в рамках текущего контроля

Таблица 2

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Лабораторная работа №1 Определение универсальной газовой постоянной методом откачки	Экспериментальная	Работа выполняется студентами попарно	4	4 - задание выполнено верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 3÷2 - задание выполнено верно, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов защиты; 1 – задания выполнены частично, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
2	Лабораторная работа №2 Определение среднего коэффициента линейного расширения методом Д.И. Менделеева	Экспериментальная	Работа выполняется студентами попарно	4	4 - задание выполнено верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 3÷2 - задание выполнено верно, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов защиты; 1 – задания выполнены частично, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
3	Лабораторная работа №3 Определение молярной массы и плотности газа методом откачки	Экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно	4	4 - задание выполнено верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 3÷2 - задание выполнено верно, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов защиты; 1 – задания выполнены частично, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
4	Лабораторная работа №4 Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха	Экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно	4	4 - задание выполнено верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 3÷2 - задание выполнено верно, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов защиты; 1 – задания выполнены частично, выводы содержат ошибки.

					0 – задания не выполнены или выполнены неверно
5	Лабораторная работа №5 Определение отношения теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме методом Клемана-Дезорма	Экспериментальная	Работа выполняется студентами попарно.	4	4 - задание выполнено верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 3÷2 - задание выполнено верно, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов защиты; 1 – задания выполнены частично, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
6	Лабораторная работа №6 Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити	Экспериментальная	Работа выполняется студентами попарно.	4	4 - задание выполнено верно и даны правильные ответы к контрольным вопросам защиты, выводы по работе обоснованы; 3÷2 - задание выполнено верно, даны правильные ответы на большую часть контрольных вопросов защиты; 1 – задания выполнены частично, выводы содержат ошибки. 0 – задания не выполнены или выполнены неверно
7	Тесты по 1 контрольной точке	С применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	9	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
8	Тесты по 2 контрольной точке	С применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	9	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
10	Коллоквиум по 1 контрольной точке	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	9	9 – ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 7÷8 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4÷6- ответы недостаточно полные; 1÷3 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.

11	Коллоквиум по 2 контрольной точке	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	9	9 – ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 7÷8 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4÷6- ответы недостаточно полные; 1÷3 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.
Итого:				60	

Карта распределения баллов в рамках промежуточной аттестации

Таблица 3

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Экзаменационный билет	Устный опрос	Билет содержит 2 теоретических вопроса. На теоретические вопросы студент должен ответить устно.	Теоретические вопросы – 30 баллов.	<p>Критерии оценивания теоретических вопросов:</p> <p>25 до 30 баллов: Глубокий уровень владения материалом, точное знание ключевых концепций, способность анализировать и интерпретировать факты, грамотно строить высказывания, привести примеры, свободно оперировать терминологией.</p> <p>От 19 до 24 баллов: Базовое владение предметом, умение последовательно раскрыть основную мысль вопроса, грамотное применение терминов, наличие существенных элементов анализа и обобщений, но недостаточное развертывание или отдельные неточности.</p> <p>От 13 до 18 баллов: Частичное освоение материала, попытка объяснить основной смысл вопроса, использование некоторых базовых терминов, но отсутствие глубокого понимания сложных моментов, логические недостатки изложения, отсутствие выводов.</p> <p>От 7 до 12 баллов: Ошибочные представления, слабо выраженное владение основными понятиями, значительные затруднения в интерпретации вопросов, существенные фактологические ошибки, отсутствие обоснованных выводов и примеров.</p> <p>От 0 до 6 баллов: Полное непонимание темы, неспособность сформулировать адекватный ответ, грубые ошибки, несоответствие требованиям задания.</p>

3. Оценочные материалы для текущего и промежуточного контроля успеваемости

3.1. Оценочные материалы для текущего контроля

Лабораторная работа № 1. Определение универсальной газовой постоянной методом откачки

Цель работы: методом откачки экспериментально определить универсальную газовую постоянную (R), постоянную Больцмана (k), число Авогадро (N_A), число Лошмидта (L). Оценить точность полученных значений.

Приборы и оборудование: вакуумный насос, стеклянная колба, манометр, электронные весы.

Краткие теоретические сведения

Используемый в этой работе метод определения универсальной газовой постоянной основан на применении уравнения Клапейрона-Менделеева для идеального газа

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

(1)

где m и μ масса и молярная масса газа, P - его давление, V - объем занимаемого им сосуда, T - абсолютная температура.

Рассматривая состояние газа при двух различных давлениях, но при неизменной температуре и объеме, (1) запишется в виде

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

(1)

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(2)

Вычитая уравнения (1) и (2), получим удобную для определения универсальной газовой постоянной R формулу:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(3)

Порядок выполнения работы

1. При открытом зажиме на колбе, взвесить колбу и определить массу m_1 колбы и содержащегося в ней воздуха (рисунок 1).

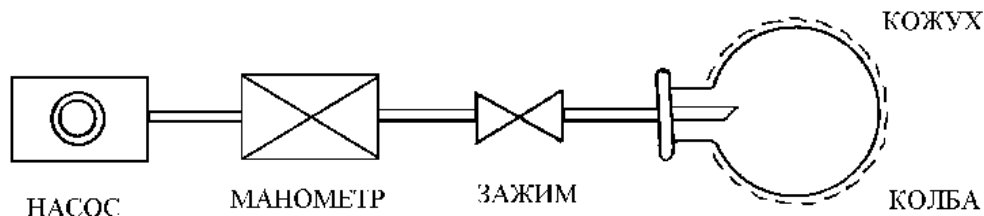


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

2. Измерить температуру в лаборатории t °С.
3. Подсоединить колбу к манометру и откачать до некоторого давления P_2 . При этом манометр показывает разность между атмосферным давлением P_1 и давлением в колбе P_2 .
4. Закрыть зажим и на весах вновь определить массу колбы и содержащегося в ней после откачки воздуха m_2 .
5. Проведите измерения п.п. 2 и 3 для 5 различных давлений и по формуле (3) вычислите R .
6. Получите формулу и рассчитайте плотность воздуха при нормальных условиях.
7. Произведите математическую обработку данных по универсальной газовой постоянной.
8. Результаты измерений и вычислений оформите в виде таблицы.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Что называется универсальной газовой постоянной (R)? Чему равна величина R , в каких единицах она измеряется? Каков физический смысл этой постоянной?
2. На чем основан метод определения газовых постоянных в данной работе? Известны ли Вам другие методы определения газовых постоянных?

3. Что такое число Авогадро (N_A)? Зависит ли число Авогадро от рода вещества и от состояния, в котором находится это вещество?

Выведите расчетную формулу для определения числа Авогадро в данной работе.

4. Что называется постоянной Больцмана (k)? Чему она равна и в каких единицах измеряется? Каков физический смысл этой постоянной? Запишите связь универсальной газовой постоянной с постоянной Больцмана.

5. Что такое число Лошмидта? Изменится ли его величина при изменении температуры?

6. Что такое парциальное давление?

7. При каких условиях закон Дальтона не выполняется?

Вопросы для защиты лабораторной работы

1. Законы идеального газа. Уравнение Клапейрона-Менделеева.

2. Вывод уравнения кинетической теории газов, определяющее величину давления молекул идеального газа на стенку сосуда. При каких допущениях выводится это уравнение?

3. Связь макроскопических и микроскопических параметров.

4. Термодинамическая вероятность.

5. Вероятность макросостояния идеального газа.

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

Цель работы: ознакомление с одним из методов определения молекулярной массы и плотности газа.

Приборы и оборудование: вакуумметр, насос, стеклянная колба, весы.

Краткие теоретические сведения

Молекулярной (молярной) массой называется масса одного моля вещества V в единицах СИ эта величина измеряется в килограммах на моль. Модем какого-либо вещества называется количество этого вещества, содержащее столько же структурных элементов (молекул, атомов и т.д.), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C . Молекулярную массу газа можно определить из уравнения газового состояния.

При не очень высоких давлениях, но достаточно высоких температурах газ можно считать идеальным. Состояние такого газа описывается уравнением Менделеева-Клапейрона:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

(1)

где P – давление газа, V – объем газа, m - масса газа. μ - молярная масса газа, $R=8,31$ Дж/(моль*К) - универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа.

Из уравнения (1) можно получить формулу для молярной массы газа:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(2)

Если измерение давления P , объема V , температуры T газа, т.е. параметров газа, входящих в формулу (2) не вызывает особенных трудностей, то определение массы газа выполнить практически невозможно, так как взвешивание газа возможно только вместе с колбой, в которой он находится. Поэтому для определения μ необходимо исключить массу сосуда. Это можно сделать, рассмотрев уравнение состояния двух масс m_1 и m_2 одного и того же газа при неизменной температуре T и объеме V .

Пусть в колбе объемом V находится газ массой m_1 при давлении P_1 и температуре T . Уравнение состояния (1) для этого газа имеет вид

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(3)

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

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(4)

Из уравнении (3) и (4) получим:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(5)

Полученная формула (5) даст возможность определить μ , если известно изменение массы газа (но не сама масса), а также изменение давления, температуры и объема газа.

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

Формула (5) пригодна и для определения μ смеси газов. Найденное в этом случае значение μ представляет собой некоторую среднюю или эффективную молярную массу смеси газов. Молярная масса смеси газов может быть рассчитана и теоретически, если известно процентное содержание и молярная масса каждого из газов, входящих в состав смеси, по формуле

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(6)

где **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..** — относительное содержание каждого газа; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ — молярные массы газов.

Если известна молярная масса газа, то можно легко определить еще одну важную характеристику газа – его плотность ρ . Плотность газа – это масса единицы объема газа:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(7)
Определив **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** из уравнения Менделеева-Клапейрона, получим

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(8)
Плотность смеси газов можно вычислить по формуле (8), подразумевая под и. эффективную молярную массу смеси.

Экспериментальная установка

Для определения молекулярной массы воздуха предназначена экспериментальная установка, общий вид которой показан на Рисунок 8.

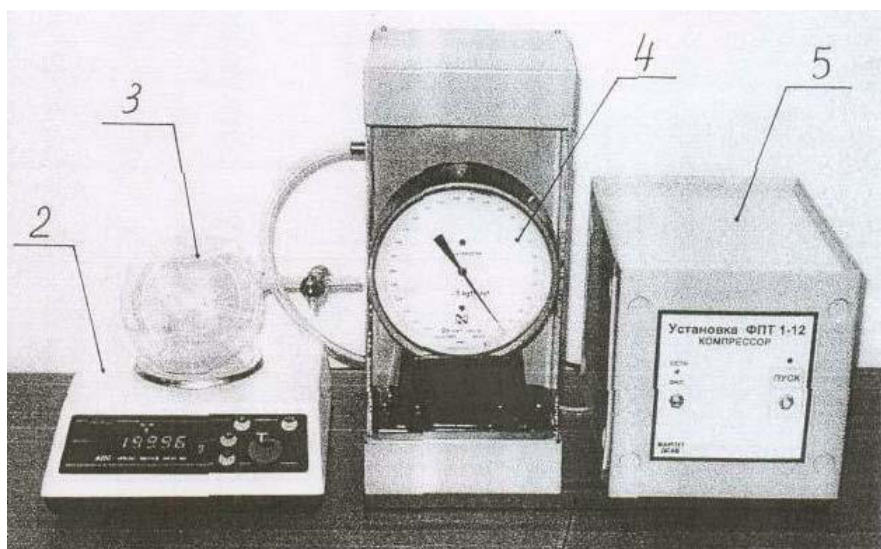


Рисунок 8. Общий вид экспериментальной установки:

1 – стойка, 2 – весы; 3 – колба; 4 – вакуумметр, 5 – компрессор

Рабочим элементом установки является стеклянная колба 3, соединенная со стрелочным вакуумметром 4, показания которого P есть разность между атмосферным давлением в лаборатории P_0 и давлением газа в колбе P_k . Колба

имеет отросток с краном, который с помощью резиновой трубки соединяется с входным патрубком компрессора 5 Колба установлена на тарелке электронных весов. Значение объема V колбы указано на рабочем месте.

Порядок выполнения работы

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

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

3. Включив компрессор тумблером «Пуск» и, открыв кран, откачать воздух из колбы до давления P_2 , после чего, закрыв кран и выключив компрессор, определить с помощью весов массу колбы с воздухом (m_0+m_2) при давлении P_2 . Полученные результаты занести в таблицу 1.

4. Повторить измерения по пп. 2 и 3 не менее 3 раз.

5. Измерить температуру T воздуха в лаборатории.

6. Выключить установку тумблером «Сеть».

Таблица 1.

№ опыта	m_0+m_1 кг	m_0+m_2 кг	$m_1 -m_2$ кг	P_1 Па	P_2 Па	P_1-P_2 Па	T , К	μ , кг/мо ль	ρ , кг/м ³

Обработка результатов измерения

1. Для каждого проведенного измерения определить массу откачанного воздуха (m_1-m_2) и разность давлений (P_1-P_2).

2. По формуле (5) вычислить для каждого измерения значение молекулярной массы воздуха **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** Найти среднее значение **<Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.>**

3. По формуле (8) вычислить для каждого измерения плотность воздуха, используя найденное значение молярной массы **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

4 Оценить погрешность результатов измерений

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Что такое молекулярная масса вещества и в каких единицах она измеряется?
2. Запишите и объясните уравнение Менделеева-Клапейрона. В каких случаях его можно использовать для практических вычислений?
3. Как теоретически рассчитать молекулярную массу смеси газов?
4. Что такое плотность газа и как ее можно определить экспериментально?
5. В чем заключается метод откачки для определения молярной массы газа?
6. Основные источники погрешностей данного метода измерения.

Вопросы для защиты лабораторной работы

1. Законы идеального газа. Уравнение Клапейрона-Менделеева.
2. Вывод уравнения кинетической теории газов, определяющее величину давления молекул идеального газа на стенку сосуда. При каких допущениях выводится это уравнение?
3. Связь макроскопических и микроскопических параметров.
4. Термодинамическая вероятность.
5. Вероятность макросостояния идеального газа.
6. Выведите расчетную формулу для определения молярной массы, которая используется в данной работе.
7. Почему молярную массу газа нельзя определить непосредственно, используя уравнение Менделеева-Клапейрона?

Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити

Приборы и оборудование: экспериментальная установка.

Цель работы: изучение теплопроводности воздуха как одного из явлений переноса в газах. Оценка точности эксперимента.

Теоретический материал: кинетические характеристики молекулярного движения газа. Средняя частота столкновений, средняя длина свободного пробега, поперечные газокинетические сечения. Процессы переноса в газах. Диффузия, теплопроводность и внутреннее трение. Стационарные и нестационарные процессы и их уравнения. Выражение коэффициентов диффузии, теплопроводности и вязкости через величины, характеризующие молекулярное движение. Связь между коэффициентами переноса. Измерение коэффициента теплопроводности. Явления переноса в разреженных газах.

Краткие теоретические сведения

Распространение теплоты в газах осуществляется тремя способами: тепловым излучением (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекцией (перенос энергии за счет перемещения слоев газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой) и теплопроводностью.

Теплопроводность - это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет хаотичного теплового движения молекул. При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией. Для стационарного процесса, при котором разность температур в слое газа не изменяется со временем, количество теплоты δQ , которая переносится вследствие теплопроводности за время dt через поверхность площадью S , перпендикулярную к направлению переноса энергии, в направлении уменьшения температуры, определяется по закону Фурье:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

(1)

где κ - коэффициент теплопроводности, dT/dr - градиент температуры.

Для идеального газа

$$\kappa = \frac{1}{2} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle c_V, \quad (2)$$

здесь ρ - плотность газа, $\langle \lambda \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекулы, $\langle v \rangle$ - средняя скорость теплового движения молекул, c_V - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$, c_V - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

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

$$q = -\kappa \frac{dT}{dr} L 2\pi r \quad (3)$$

Разделяя переменные, получим

$$\kappa r dr = -\frac{dT}{L} 2\pi r L \quad (4)$$

Тогда

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

или

$$\kappa \left[\frac{r^2}{2} \right]_{R_1}^{R_2} = -2\pi \left[\frac{r^2}{2} \right]_{T_1}^{T_2} \quad (4)$$

здесь T_1, R_1 и T_2, R_2 - соответственно температуры поверхностей и радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

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

$$\kappa = \frac{2\pi L (T_1 - T_2)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (5)$$

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

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

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

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

Если последовательно с проволокой включить эталонный резистор сопротивления R_p , то

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,
и тогда

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,
где U_p - падение напряжения на эталонном резисторе. Используя равенство (6) в формуле (5), получим

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

здесь D и d - диаметры наружного цилиндра и проволоки; $\Delta T = T_H - T_T$, - разность температур проволоки и наружного цилиндра (трубки). (7)

Температуру трубки T_T можно принять равной температуре окружающей воздуха. Для вычисления разности температур ΔT в слое газа напишем формулы, по которым определяют сопротивление проволоки при температуре окружающего воздуха и в нагретом состоянии:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,
Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

где R_0 - сопротивление проволоки при $t=0^\circ\text{C}$; α - температурный коэффициент сопротивления материала проволоки.

Исключив из этих равенств R_0 , найдем

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

Учитывая, что $R_H = \frac{U_H}{I_H}$, $I_H = \frac{U_F}{R_F}$ и $R_{H.0.} = \frac{U_{H.0.}}{I_{H.0.}}$, $I_{H.0.} = \frac{U_{F.0.}}{R_{F.0.}}$,

Получим

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_F} - \frac{U_{H.0.}}{U_{F.0.}}\right)(1 + \alpha t_0)}{\frac{U_{H.0.}}{U_{F.0.}} \alpha}, \quad (8)$$

где U_H , $U_{H.0.}$ - падение напряжения на проволоке соответственно в нагретом состоянии и при температуре окружающего воздуха t_0 ; U_F , $U_{F.0.}$ - падение напряжения на эталонном резисторе соответственно при нагретой проволоке и при температуре окружающего воздуха t_0 .

Экспериментальная установка

Для определения коэффициента теплопроводности воздуха предназначена экспериментальная установка, общий вид которой показан на рисунке 1. Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную трубку, заполненную воздухом, вдоль оси которой натянута вольфрамовая проволока 4.



Рисунок 1 - Общий вид экспериментальной установки:
 1 - блок приборов; 2 - цифровой термометр; 3 - блок рабочего элемента, 4 - вольфрамовая проволока; 5 - стойка; 6 - датчик температуры (термопара).

Температура трубки в ходе эксперимента поддерживается постоянной, благодаря принудительной циркуляции воздуха между трубкой и кожухом блока рабочего элемента 3, которая осуществляется с помощью вентилятора, находящегося в блоке рабочего элемента. Температура воздуха в трубке измеряется цифровым термометром 2. Значения падения напряжения на эталонном резисторе U_p и на проволоке U_H измеряются цифровым вольтметром.

Значение напряжения на проволоке устанавливается регулятором **Нагрев**, который находится на передней панели блока приборов 1. Геометрические размеры рабочего элемента: диаметр трубки $D=0,026$ м; диаметр проволоки $d=64 \cdot 10^{-5}$ м; длина трубки $L = 0,402$ м; температурный коэффициент сопротивления материала проволоки $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; сопротивление на эталонном резисторе $R_p = 7,5$ Ом. указаны на рабочем месте.

Порядок выполнения работы.

1. Включить установку тумблером Сеть. Включить тумблер Нагрев.
2. Нажать кнопку " UP" (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе) и с помощью регулятора Нагрев установить падение напряжения не более 0,06 В, при котором температура проволоки остается практически неизменной ("ненагревающий" ток).
3. Нажать кнопку УН (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрировать значение напряжения
4. Повторить измерения по пп. 2-3 для 3-5 значений напряжения UP.О. Все результаты занести в таблицу 1.
5. Нажать кнопку Up и с помощью регулятора Нагрев, установить падение напряжения на эталонном резисторе Up в диапазоне 0,3 ... 1,5 В.
6. Подождав 2 минуты, что необходимо для стабилизации теплового режима рабочего элемента, нажать кнопку УН и определить падение напряжения на проволоке УН .
7. Повторить измерения по пп. 5-6 для 3-5 значений падения напряжения Up . Результаты занести в таблицу 1.

Таблица.1

Номер изме-рен.	U_p , В,	$U_{н.о.}$,В	t_0 , °С	U_p , В	U_n , В	Ошиб-ка! Обь-	Ошиб-ка! Обь-ект не

8. Установить ручку регулятора **Нагрев** на минимум. Отключить тумблер **Нагрев**, после чего отключить установку тумблером **Сеть**.

Обработка результатов измерения

1. Для каждого измерения по формуле (8) рассчитать разность температур ΔT , а по формуле (7) - коэффициент теплопроводности **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** и занести полученные значения в таблицу.

2. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха
<Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.>

3. Оценить погрешность результатов измерения.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Расскажите о возможных способах передачи теплоты.

2. В чем суть явления теплопроводности? Какая величина переносится при теплопроводности?

3. Какая величина называется тепловым потоком? В каких единицах СИ она измеряется?

4. Какой формулой описывается поток теплоты, перенесенной при теплопроводности?

5. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? В каких единицах СИ измеряется эта величина?

6. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа.

7. Объясните понятие градиента температуры.

8. В чем заключается метод нагретой нити для определения коэффициента теплопроводности газов?

9. Объясните назначение эталонного резистора в схеме экспериментальной установки.

10. Как определяется разность температур проволоки и наружной трубки в данной работе?

Вопросы для защиты лабораторной работы

Теплопроводность газов. Закон Фурье.

Нестационарная теплопроводность.

Стационарная теплопроводность.

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и давления.

. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление теплопроводности?

Выведите расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.

Запишите связь между коэффициентами вязкости, теплопроводности и диффузии газа.

Лабораторная работа № 4. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха

Приборы и оборудование: цилиндрический сосуд с капилляром, весы с разновесами, стеклянный стаканчик, секундомер.

Цель работы: вычисление длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха (азот составляет 78,1 % воздуха) по коэффициенту внутреннего трения (вязкости), методом истечения воздуха через капилляр.

Краткие теоретические сведения

Заметное отклонение 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, так как длины 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) свя-

заны с его микроскопическими (размеры молекулы, её масса, скорость). Пользуясь этими формулами, можно при помощи легко измеряемых макропараметров - давления, температуры, коэффициента внутреннего трения - получить интересующие нас микропараметры - размеры молекулы, длину её свободного пробега и т.д.

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

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. υ ,

(1)

где η - коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость), λ - средняя длина свободного пробега, υ - средняя арифметическая скорость молекул, т.е. среднее значение абсолютной величины скорости молекул, ρ - плотность газа. Из формулы (1) получаем:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

(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

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

(3)

где r - радиус, l - длина трубки.

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

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

$\upsilon =$ **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

(4)

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

Плотность газа можно найти из уравнения Клапейрона-Менделеева

$$\rho = \frac{P \mu}{R T} \quad (5)$$

где P - давление газа.

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

$$\lambda = \frac{R T}{\sqrt{2} P \mu} \quad (6)$$

Эффективный диаметр молекулы можно вычислить из формулы, выражающей его связь с длиной свободного пробега:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n D} \quad (7)$$

где n - число молекул в единице объема при данных условиях, D - эффективный диаметр молекулы.

Число молекул в единице объема при данных условиях выражается формулой:

$$n = n_0 \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad (8)$$

где n_0 - число Лошмидта, число молекул в единице объема при нормальных условиях (P_0 , T_0).

Используя формулы (7) и (8), получаем выражение для эффективного диаметра молекул газа:

$$D = \frac{R T}{\sqrt{2} P \mu} \quad (9)$$

Для вычисления длины свободного пробега по формуле (6) и эффективного диаметра D по формуле (9) необходимо знать радиус и длину трубки, через которую протекает газ, разность давлений на её концах, температуру и

давление окружающей среды и объем газа, протекающего трубку за определенное время.

Схема экспериментальной установки

Установка для выполнения работы (рисунок 1) состоит из стеклянного сосуда А, имеющего внизу кран 1, а сверху закрытого пробкой 3, через которую пропущен капилляр 4.

Сосуд на $3/4$ заполняется водой. Если открыть кран, вода выливается из сосуда отдельными каплями, а над поверхностью воды создается пониженное давление. Таким образом, концы капилляра будут находиться под разным давлением (верхний конец - под атмосферным, нижний - меньше атмосферного), что обуславливает протекание воздуха через капилляр.

Так как капилляр очень узок и воздух просачивается через него медленно, выравнивание давления на концах капилляра не произойдет. Для отсчета уровней воды в сосуде служит шкала 5.



Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Заполнить сосуд А водой на $3/4$ объема.

Открыть кран 1 и, дождавшись, когда вода начнет вытекать из сосуда каплями, подставить предварительно взвешенный стаканчик, включив одновременно секундомер.

Измерить по шкале 5, укрепленной на сосуде А, высоту начального уровня воды h_1 (в момент начала появления капель).

Когда в стаканчике будет приблизительно 50-70 см³ воды перекрыть кран и остановить секундомер. Записать время истечения жидкости.

Измерить новый уровень воды h_2 .

Взвесить стаканчик с водой и по массе вытекшей воды определить её объем, который будет равен объему воздуха, вошедшего в сосуд через капилляр.

Разность давления на концах капилляров рассчитать по формуле:

$$\Delta P = \rho_1 g \text{ Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.}, \quad (10)$$

где ρ_1 - плотность воды.

Температуру измерить комнатным термометром, а атмосферное давление определить барометром.

Значения радиуса и длины капилляра $r=0,05$ мм и $l=15$ см. **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

Вычислить длину свободного пробега молекулы воздуха (азота) по формуле (6).

Опыт повторить 5 раз.

По среднему значению длины свободного пробега найти эффективный диаметр молекулы азота по формуле (9).

Оценить возможные источники погрешности метода.

Провести статистическую обработку (методом Стьюдента) результатов измерений длины свободного пробега.

Составить отчет по работе.

Вопросы для допуска к выполнению работы

Что изучается в данной работе? Какой экспериментальный метод используется? Какова методика?

Что такое длина свободного пробега молекул газа? Что такое эффективный диаметр молекул?

Вероятность столкновения и длина свободного пробега молекул.

От чего зависит длина свободного пробега и эффективный диаметр молекул?

Что такое вакуум? Чему равна длина свободного пробега в условиях вакуума?

На чем основан метод определения длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул азота в этой работе? Для какого течения газа справедлив этот метод? Запишите формулу Пуазейля.

Какие величины, входящие в расчетные формулы длины свободного пробега и эффективного диаметра, вносят наибольший вклад в ошибку измерения?

Вопросы для защиты лабораторной работы

Сечения процесса упругого рассеяния молекул и его опытное определение.

Средняя длина свободного пробега молекул и среднее число столкновения молекул.

Броуновское движение.

Опыт Перрена по определению постоянной Больцмана.

Вязкость.

Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом

Цель работы: определение коэффициента динамической вязкости воздуха методом истечения воздуха через капилляр. Изучение внутреннего трения воздуха как одного из явлений переноса в газах.

Краткие теоретические сведения

Явления переноса - это процессы установления равновесия в системе путем переноса массы (диффузия), энергии (теплопроводность) и импульса молекул (внутреннее трение, или вязкость). Все эти явления обусловлены тепловым движением молекул.

При явлении вязкости наблюдается перенос импульса от молекул из слоев потока, которые двигаются быстрее, к более медленным. Например, в случае протекания жидкости или газа в прямолинейной цилиндрической трубе (капилляре) при малых скоростях потока течение является ламинарным, т.е. поток газа движется отдельными слоями, которые не смешиваются между собой. В этом случае слои представляют собой совокупность бесконечно тонких цилиндрических поверхностей, вложенных одна в другую, имеющих общую ось, совпадающую с осью трубы.

Вследствие хаотического теплового движения молекулы непрерывно переходят из слоя в слой и при столкновении с другими молекулами обмениваются импульсами направленного движения. При переходе из слоя с большей скоростью направленного движения в слой с меньшей скоростью молекулы переносят в другой слой свой импульс направленного движения. В "более быстрый" слой переходят молекулы с меньшим импульсом. В результате первый слой тормозится, а второй - ускоряется. Опыт показывает, что импульс dP , который передается от слоя к слою через поверхность S , пропорционален градиенту скорости **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**, площади S и времени переноса dt :

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

В результате между слоями возникает сила внутреннего трения,

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., где η - коэффициент вязкости.

Для идеального газа:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

здесь ρ - плотность газа; $\langle \lambda \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекул; $\langle v \rangle$ - средняя скорость теплового движения молекул, **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**;

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. - молекулярная масса газа; R - универсальная газовая постоянная.

Выделим в капилляре воображаемый цилиндрический объем газа радиусом r и длиной l , как показано на рисунке 1. Обозначим давления на его торцах P_1 и P_2 . При установившемся течении сила давления на цилиндр

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

(1)

уравновесится силой внутреннего трения F_T , которая действует на боковую поверхность цилиндра со стороны внешних слоев газа.

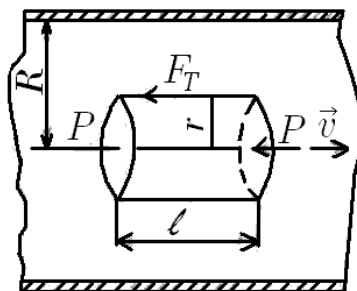


Рисунок 1 - К расчету объемного расхода газа в случае течения его через капилляр

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

(2)

Сила внутреннего трения определяется по формуле Ньютона (1). Учитывая, что $S=2\pi r l$ и скорость $v(r)$ уменьшается при удалении от оси трубы, т.е. **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** $v(r) < 0$, можно записать:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(3)

В этом случае условие стационарности (2) запишется в виде:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(4)

Интегрируя это равенство, получим

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

где C - постоянная интегрирования, которая определяется граничными условиями задачи.

При $r=R$ скорость газа должна обратиться в нуль, поскольку сила внутреннего трения о стенку капилляра тормозит смежный с ней слой газа. Тогда

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

Подсчитаем объемный расход газа Q , т.е. объем, что протекает за единицу времени через поперечное сечение трубы. Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним $r+dr$ ежесекундно протекает объем газа

Тогда

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

Или

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(6)

Формулу (6), которая называется формулой Пуазейля, можно использовать для экспериментального определения коэффициента вязкости газа.

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

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

(7)

где $\langle v \rangle$ - средняя скорость потока, ρ - плотность жидкости или газа, R - радиус капилляра.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при Re **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** 1000. Поэтому в случае использования формулы Пуазейля необходимо обеспечить выполнение условия $Re < 1000$. Кроме этого, эксперимент необходимо проводить таким образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда перепад давлений вдоль капилляра значительно меньше самого давления. В данной установке давление газа несколько больше атмосферного (10^3 см вод.ст.), а перепад давлений составляет от ~ 10 см вод.ст., т.е. приблизительно 1% от атмосферного.

Формула (6) справедлива для участка трубы, в котором установилось постоянное течение с квадратичным законом распределения скоростей (5) по сечению трубы. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия $R \ll L$, где R - радиус; L - длина капилляра.

Экспериментальная установка

Для определения коэффициента вязкости воздуха предназначена экспериментальная установка, общий вид которой изображен на рисунке 1.

Воздух в капилляр 4 нагнетается микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 2. Объемный расход воздуха измеряется реометром 5, а нужное его значение устанавливается регулятором **Воздух**, который находится на передней панели блока приборов. Для измерения разности давлений воздуха

на концах капилляра предназначен U-образный водяной манометр 6. Геометрические размеры капилляра - радиус R и длина L равны: $R = 0,5$ мм, $L=0.1$ м.

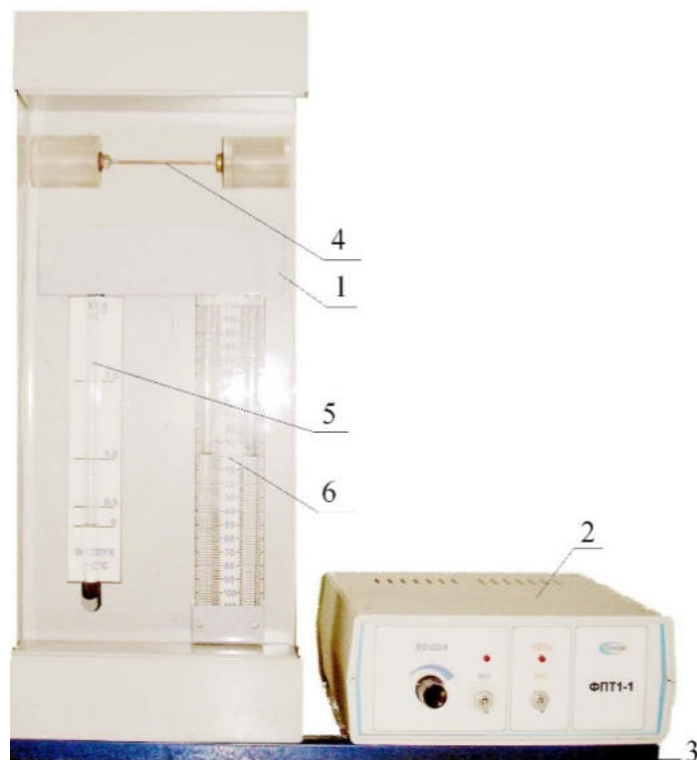


Рисунок 1 - Общий вид экспериментальной установки : 1 - блок рабочего элемента; 2 - блок приборов; 3 - стойка, 4 - капилляр; 5 - реометр; 6- манометр.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером Сеть.
2. С помощью регулятора Воздух установить по показаниям реометра выбранное значение объемного расхода воздуха Q .
3. Измерить разность давлений ΔP в коленах манометра. Значения Q и ΔP занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер измерения	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta P, \text{ Па}$	ОШИБКА! ОБЪЕКТ НЕ МОЖЕТ БЫТЬ СОЗДАН ИЗ КОДОВ ПОЛЕЙ РЕДАКТИРОВАНИЯ., кг/ (м • с)

4. Повторить измерения по пп. 2-3 для 5 значений объемного расхода воздуха (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0) · 10⁻⁵ м³.

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

Обработка результатов измерений

1. Для каждого режима определить по формуле Пуазейля коэффициент вязкости воздуха:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.. Найти среднее значение коэффициента вязкости.

2. По формуле $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль К).

3. По формуле $\lambda = \frac{RT}{p}$ вычислить среднюю длину свободного пробега молекул. При этом плотность воздуха найти по табл. 1 для известных значений температуры и давления в лаборатории в процессе проведения эксперимента.

4. Для того чтобы установить, было ли течение воздуха ламинарным вычислить число Рейнольдса по формуле 7.

5. Оценить погрешность результатов измерения.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1. Расскажите о явлениях переноса в газах.

2. Объясните явление внутреннего трения в идеальном газе с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

3. Напишите и объясните формулу Ньютона для внутреннего трения.

4. Какой физический смысл коэффициента вязкости? В каких единицах СИ измеряется эта величина?

5. Напишите формулу для коэффициента вязкости идеального газа.

6. Какая величина называется средней скоростью теплового движения молекул идеального газа? От каких физических величин она зависит?

7. Какая величина называется средней длиной свободного пробега молекулы? От каких физических величин она зависит?

8. В чем заключается капиллярный метод определения коэффициента вязкости газов?

Вопросы для защиты лабораторной работы

1. Явление диффузии. Закон Фика.

2. Нестационарная диффузия.

3. Стационарная диффузия.

4. Вязкость газов. Закон Ньютона.

5. Вывод формулы для коэффициента вязкости.

6. Выведите формулу Пуазейля. При каких условиях ее применяют?

7. Как изменяется скорость движения газа по радиусу канала при ламинарном режиме течения?

8. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление внутреннего трения в газах?

9. Почему при строительстве магистральных газопроводов используют трубы большого диаметра, а не увеличивают давление газа при его транспортировании.

10. Объясните, как меняется коэффициент вязкости газа при изменении давления, если газ находится:

а) в состоянии далеко от вакуума;

б) в состоянии вакуума;

11. Как меняется коэффициент вязкости газа при изменении температуры, если газ находится:

а) в состоянии далеко от вакуума;

б) в состоянии вакуума.

12. Запишите связь между коэффициентами вязкости, теплопроводности, и диффузии газа.

Лабораторная работа № 6. Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и объеме методом Клемана- Дезорма
Приборы и оборудование: экспериментальная установка.

Цель работы: изучение процессов в идеальных газах, определение отношения теплоемкостей **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..**

Краткие теоретические сведения

Удельной теплоемкостью вещества называется величина, равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить единице массы вещества для увеличения ее температуры на один Кельвин:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(1)

Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(2)

где m - масса, μ - молярная масса вещества.

Значение теплоемкости газов зависит от условия их нагревания Согласно с первым законом термодинамики количество теплоты δQ , сообщенное системе, расходуется на увеличение внутренней энергии dU и на выполнение системой работы δA против внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A .$$

(3)

Увеличение внутренней энергии идеального газа в случае изменения его температуры на dT

$$dU = \frac{m \cdot i}{\mu \cdot 2} R dT, \quad (4)$$

здесь i - число степеней свободы молекулы, под которым подразумевается число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: $i = 3$ - для одноатомной; $i = 5$ - для двухатомной, $i = 6$ - для трех- и многоатомной; R - универсальная газовая постоянная; $R = 8,31$ Дж/ (моль-К)

При расширении газа система выполняет работу

$$\delta A = p dV. \quad (5)$$

Если газ нагревать при постоянном объеме $V = \text{const.}$, то $\delta A = 0$ и согласно с (3) все полученное газом количество теплоты расходуется только на увеличение его внутренней энергии $dQ_v = dU$ и, учитывая (4), молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме

$$\mu C_v = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R.$$

Если газ нагревать при постоянном давлении $P = \text{const.}$, то полученное газом количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии dU и выполнение работы δA :

$$\delta Q_p = dU + P dV.$$

Тогда молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.. (7)

Используя уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-

Менделеева)

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

можно доказать, что для моля газа

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

и, поэтому

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

(8)

Отношение теплоемкостей:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(9)

Адиабатным называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, $dQ=0$.

На практике он может быть осуществлен в системе, окруженной теплоизоляционной оболочкой, но поскольку для теплообмена необходимо некоторое время, то адиабатным можно считать также процесс, который протекает так быстро, что система не успевает вступить в теплообмен с окружающей средой. Первый закон термодинамики с учетом (4)-(6) для адиабатного процесса имеет вид

$$\frac{m}{\mu} \mu C_V dT = -P dV$$

(10)

Продифференцировав уравнение Клапейрона-Менделеева

$$P dV + V dP = \frac{m}{\mu} R dT$$

и подставляя dT в формулу (10), получим

$$(\mu C_V + R) P dV + \mu C_V V dP = 0$$

Учитывая соотношение между молярными теплоемкостями идеального газа при постоянном давлении и объеме, которое описывается формулой Манера (8), а также (9), получим

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

Решение написанного дифференциального уравнения имеет вид

$$PV^\gamma = \text{const}$$

(11)

Уравнение (11) называется уравнением адиабаты (уравнением Пуассона), а введенная в (9) величина γ - показателем адиабаты.

Метод определения показателя адиабаты, предложенный Клеманом и Дезормом (1819г), основывается на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами - адиабатным и изохорным. Эти процессы на диаграмме $P - V$ (рисунок 1) изображены кривыми соответственно 1-2 и 2-3. Если в баллон, соединенный с открытым водяным манометром, накачать воздух и подождать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в этом начальном состоянии 1 газ имеет параметры P_1, V_1, T_1 , причем температура газа в баллоне равна температуре окружающей среды $T_1 = T_0$, а давление $P_1 = P_0 + P^1$ немного больше атмосферного.

Если теперь на короткое время соединить баллон с атмосферой, то произойдет адиабатное расширение воздуха. При этом воздух в баллоне перейдет в состояние 2, его давление понизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Масса воздуха, оставшегося в баллоне, которая в состоянии 1 занимала часть объема баллона, расширяясь, займет весь объем V_2 . При этом температура воздуха, оставшегося в баллоне, понизится до T_2 . Поскольку процесс 1 - 2 - адиабатный, к нему можно применить уравнение Пуассона

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..

(12)

Отсюда

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. .

(13)

После кратковременного соединения баллона с атмосферой охлажденный из-за адиабатного расширения воздух в баллоне будет нагреваться (процесс 2 - 3) до температуры окружающей среды $T_3=T_0$ при постоянном объеме $V_3=V_2$. При этом давление в баллоне поднимется до $P_3=P_2+P$.

Поскольку процесс 2-3 - изохорный, то к нему можно применить закон Шарля:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.
 отсюда **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** (14)

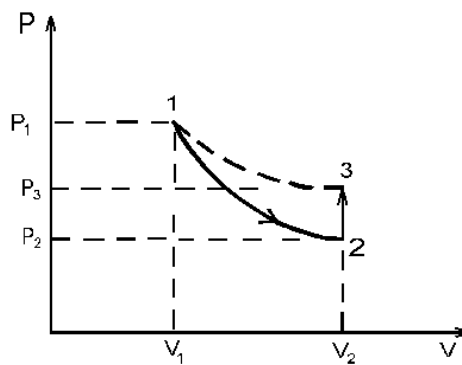


Рисунок 1 - Процессы изменения состояния газа во время проведения опыта
 Из уравнения (12) и (13) получим:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

Прологарифмируем:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

Поскольку избыточные давления P' и P'' очень малы по сравнению с атмосферным давлением P_0 и учитывая что при $x \ll 1$ $\ln(1+x) \approx x$, будем иметь:

$$\frac{(\gamma - 1)P_0}{\gamma P_0} = \dots$$

$$\gamma = \frac{P' - P''}{\rho g H} \quad (15)$$

откуда

Избыточные давления P' и P'' измеряют с помощью U-образного манометра

по разности уровней жидкости с плотностью ρ :

$$\frac{P' - P''}{\rho g H} = \rho g h \quad (16)$$

Из (15) и (16) получим расчетную формулу для определения γ :

$$\gamma = \frac{H}{H - h} \quad (17)$$

Экспериментальная установка.

Для определения отношения теплоемкостей воздуха **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** предназначена экспериментальная установка, общий вид которой показан на рисунок 2.

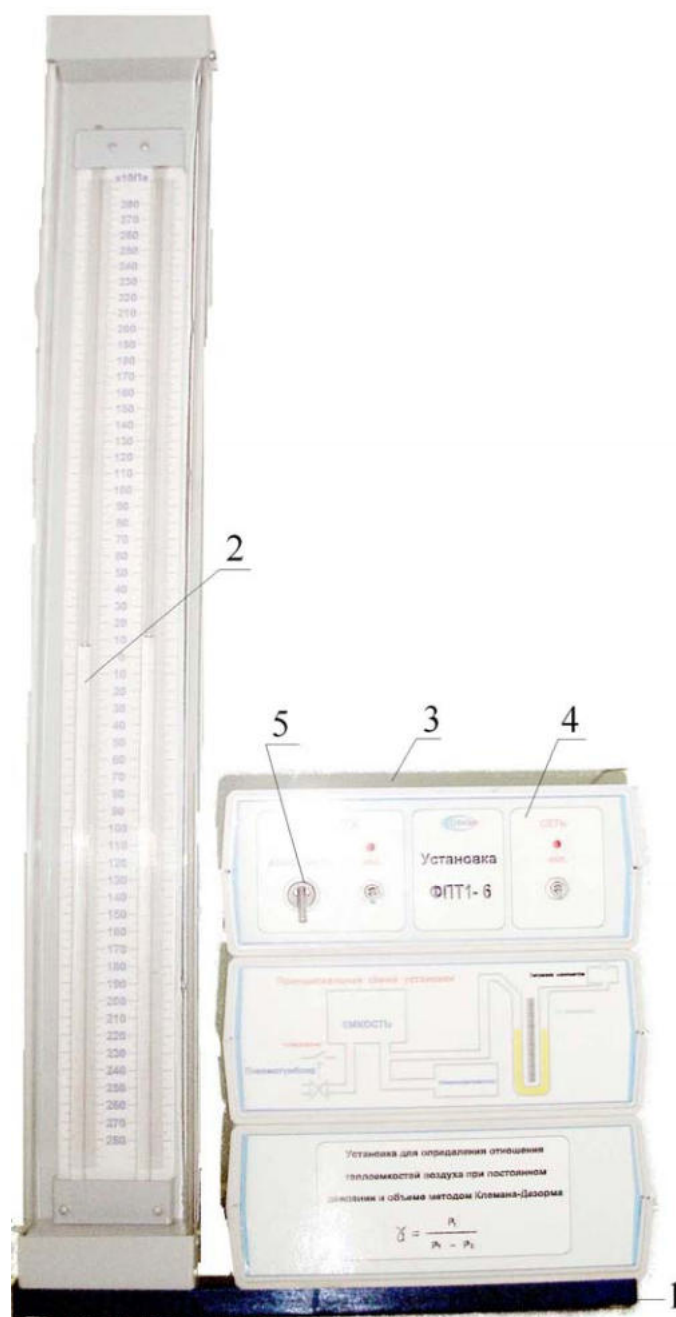


Рисунок 2 - Общий вид экспериментальной установки:

1 - стойка; 2 - блок манометра; 3 - блок рабочего элемента; 4 - блок приборный; 5 - пневмотумблер "Атмосфера"

Установка состоит из стеклянной колбы, соединенной с открытым водяным манометром 2. Воздух нагнетается в колбу микрокомпрессором, размещенным в блоке рабочего элемента 3. Микрокомпрессор включается тумблером **Воздух**, установленным на передней панели блока приборов 4. Пневмотумблер **Атмосфера** 5, расположенный на панели блока рабочего элемента, в положении **Открыто** позволяет соединять колбу с атмосферой.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить установку тумблером **Сеть**
2. Установить пневмотумблер **Атмосфера** в положение **Закрыто**. Для подачи воздуха в колбу включить тумблер **Воздух**.
3. С помощью манометра контролируют давление в колбе. Когда разность уровней воды в манометре достигнет 150...250 мм вод. ст., отключить подачу воздуха.
4. Подождать 2 ,..3 мин., пока температура воздуха в колбе сравняется с температурой окружающего воздуха $T_в$, в колбе при этом установится постоянное давление $P_1 = P_0 + \rho g H$. Определить разность уровней H , установившуюся в коленах манометра, и полученное значение занести в табл. 1.

Таблица 1.

Номер измерения	H , мм вод.ст	h , мм вод.ст,	T
-----------------	-----------------	------------------	-----

5. На короткое время соединить колбу с атмосферой, установив пневмотумблер **Атмосфера** в положение **Открыто**.
6. Через 2...3 мин., когда в колбе установится постоянное давление $P_3 = P_0 + \rho g h$ определить разность уровней h , установившуюся в коленах манометра, и полученное значение занести в табл. 1.
7. Повторить измерения по пп.2-6 не менее 10 раз при различных значениях величины H .
8. Выключить установку тумблером **Сеть**.

Обработка результатов измерения

1. Для каждого измерения определить по формуле (17) отношение теплоемкостей γ . Найти среднее значение $\langle \gamma \rangle$.
2. Оценить погрешность результатов измерения.

Вопросы для допуска к выполнению работы

1 Что такое изопроцессы и каким законам они подчиняются? Нарисуйте графики этих процессов.

2. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?

3. В чем особенности теплоемкости газа? Выведите формулу для молярных теплоемкостей C_V и C_P идеального газа.

4. Дайте определение числа степеней свободы молекулы. Чему равна величина для 1-, 2-, 3- и многоатомного идеальных газов.

5. В чем заключается метод Клемана и Дезорма для определения отношения **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

6 Опишите рабочий цикл экспериментальной установки по P-V диаграмме.

7. Как и почему изменяется температура газа в колбе при проведении опыта?

Вопросы для защиты лабораторной работы

1. Сформулируйте первый закон термодинамики. Запишите этот закон для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов.
2. Какой процесс называется адиабатным? Выведите уравнение Пуассона.
3. Рассчитайте теоретическое значение показателя адиабаты для 1-, 2- и 3- атомного идеального газа.
4. Выведите расчетную формулу для определения γ .

Вопросы для тестирования

I:

S: Теплоемкостью называется

-: все ответы правильные

+: количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1 градус

-: произведение давления на температуру

-: отношение количества теплоты к температуре

I:

S: Уравнение состояния устанавливает связь между

- : давлением и объёмом
- : температурой, давлением и энтропией
- +: температурой, давлением и объёмом
- : температурой и давлением

I:

S: Первое начало термодинамики утверждает:

- : количество теплоты идет на изменение внутренней энергии тела
- : работа, совершаемая газом, равна произведению давления на объём
- : количество теплоты идет на изменение внутренней энергии и на совершение работы
- : количество теплоты идет на совершение работы

I:

S: Давление идеального газа равно

- : $P=VRTn$,
- : $P=VKTn$, k
- +: $P=nkT$
- : $P=TNVk$

I:

S: Теплоемкость идеального газа при постоянном давлении равна

- : $C_p+R=C_v$, T
- +: $C_p - R=C_v$,
- : $C_p+R= C_v-T$
- : $C_p - R=C_v$

I:

S: Какова среднеквадратическая скорость молекул азота (м/с) при температуре 7°C ?

($M=28$ г/моль, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К)

- : 840
- +: 500
- : 720
- : 900

I:

S: Как изменится давление газа, если его объем уменьшится в 2 раза, а среднеквадратическая скорость его молекул уменьшится в $\sqrt{2}$ раз?

- : уменьшится в 8 раз;
- +: не изменится;
- : увеличится в 4 раза;
- : уменьшится в 4 раза;

I:

S: Укажите, в каком из ответов наиболее полно представлены основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества?

- : вещество состоит из элементарных частиц, и они взаимно превращаются друг в друга;
- : вещество состоит из мельчайших частиц и между ними действуют силы;
- +: вещество состоит из маленьких частей, и они заполняют пространство;
- : все тела состоят из молекул или атомов, которые непрерывно и хаотически движутся;
- : между молекулами и атомами действуют силы притяжения и отталкивания.

I:

S: Какова масса одной молекулы воды (г), если ее молярная масса равна 18 г?

- : 10^{-23}
- +: $3 \cdot 10^{-23}$
- : $3 \cdot 10^{-24}$
- : 10^{-26}

I:

S: Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул (выберите правильные варианты ответов)?

- +: зависит от температуры;
- : зависит от массы молекул;
- +: не зависит от массы молекулы;
- +: не зависит от агрегатного состояния вещества

I:

S: Определите отношение числа молекул в 36 г воды к числу молекул в 2 г водорода.

- : 0,5
- : 1
- +: 2
- : 3

I:

S: Оцените, во сколько примерно раз среднее расстояние между молекулами в газах при нормальных условиях больше размеров самих молекул газа

- : 80-100
- : 800-1000
- : 8000-10000
- +: 8-10

I:

S: Во сколько раз увеличится среднеквадратическая скорость молекул идеального газа при повышении абсолютной температуры в 2 раза?

- : $2\sqrt{2}$
- +: $\sqrt{2}$
- : 2
- : 4

I:

S: Какое количество вещества (моль) содержится в 144 г воды? $M(H)=1$ а.е.м.,
 $M(O)=16$ а.е.м.

-: 6

+: 8

-: 4

-: 10

I:

S: При какой температуре (К) среднеквадратическая скорость атомов гелия будет такой же, как и среднеквадратическая скорость молекул водорода при температуре 300 К?

-: 50

-: 400

-: 100

+: 600

I:

S: Чему равна масса (кг) одной молекулы медного купороса $CuSO_4$, если атомные массы меди, серы и кислорода равны соответственно 64, 32 и 16 а.е.м., а число Авогадро составляет $6 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹

+: $2,67 \cdot 10^{-25}$

-: $2 \cdot 10^{-22}$

-: $2 \cdot 10^{-23}$

-: $26,7 \cdot 10^{-23}$

I:

S: Оцените среднеквадратическую скорость молекул водорода при температуре 80 К (м/с), $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

-: 500

-: 1200

+: 1000

-: 800

I:

S: Какое количество вещества (моль) содержится в 98 г серной кислоты H_2SO_4 ? Относительные атомные массы водорода, серы и кислорода равны соответственно 1,32 и 16 а.е.м.

-: 0,5

-: 1,5

-: 2

+: 1

I:

S: Плотность воздуха при нормальных условиях равна $1,29$ кг/м³. Определите молярную массу воздуха (кг/моль):

+: $29 \cdot 10^{-3}$

-: $0,29 \cdot 10^{-3}$

-: $2,9 \cdot 10^{-3}$

-: $29 \cdot 10^{-2}$

I:

S: Давление идеального газа зависит от:

-: силы притяжения между молекулами

+: кинетической энергии молекул

-: силы отталкивания между молекулами

: потенциальной энергии взаимодействия молекул

Вопросы, выносимые на коллоквиум

Коллоквиум 1

1. Макроскопическое и микроскопическое состояние термодинамической системы
2. Масса и размеры молекул.
3. Тепловое равновесие. Понятие температуры.
4. Модель идеального газа. Законы, описывающие поведение идеального газа.
5. Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Клапейрона – Менделеева.
6. Внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики.
7. Работа, совершаемая телом при изменениях объема.
8. Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекулы.
9. Теплоемкость. Уравнение Майера.
10. Недостатки классической теории теплоемкости. Понятие о квантовой теории теплоемкости.
11. Некоторые понятия из теории вероятности.
12. Характер теплового движения молекул.
13. Число ударов молекул о стенку. Давление газа на стенку.
14. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов.
15. Закон Максвелла о распределении молекул по скоростям и энергиям.
16. Барометрическая формула.
17. Распределения Больцмана и Максвелла – Больцмана.
18. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул.
19. Опытное обоснование молекулярно – кинетической теории.
20. Энтропия идеального газа. Некоторые применения энтропии.

Коллоквиум 2

1. Термодинамические потенциалы.

2. . Макро – и микросостояние. Статистический вес.
3. Энтропия
4. Адиабатный процесс. Политропный процесс.
5. Обратимые и не обратимые процессы. Круговой процесс (цикл).
6. Второе начало термодинамики. Теорема Нернста.
7. Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно и его КПД для идеального газа.
8. Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия.
9. Уравнение Ван – дер – Ваальса.
10. Изотермы Ван – дер – Ваальса и их анализ.
11. Свойство жидкостей. Поверхностное натяжение.
12. Смачивание.
13. Давление под искривленной поверхностью жидкости.
14. Твердые тела. Моно- и поликристаллы
15. Типы кристаллических твердых тел
16. Дефекты в кристаллах
17. Теплоемкость твердых тел. Модель Эйнштейна и Дебая
18. Испарение, сублимация, плавление и кристаллизация. Аморфные тела
19. Явления переноса в термодинамически неравновесных система.
20. Вакуум и методика его получения. Свойства ультраразреженных газов.

Оценочные материалы для промежуточной аттестации

Экзамен проводится по билетам. В каждом билете 2 теоретических вопроса.

Экзаменационные вопросы

1. Макроскопическое и микроскопическое состояние термодинамической системы
2. Масса и размеры молекул.
3. Тепловое равновесие. Понятие температуры.
4. Модель идеального газа. Законы, описывающие поведение идеального газа.
5. Уравнение состояния идеального газа - Уравнение Клапейрона – Менделеева.
6. Внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики.
7. Работа, совершаемая телом при изменениях объема.
8. Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекулы.
9. Теплоемкость. Уравнение Майера.
10. Недостатки классической теории теплоемкости. Понятие о квантовой теории теплоемкости.

11. Некоторые понятия из теории вероятности.
12. Характер теплового движения молекул.
13. Число ударов молекул о стенку. Давление газа на стенку.
14. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов.
15. Закон Максвелла о распределении молекул по скоростям и энергиям.
16. Барометрическая формула.
17. Распределения Больцмана и Максвелла – Больцмана.
18. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул.
19. Опытное обоснование молекулярно – кинетической теории.
20. Энтропия идеального газа. Некоторые применения энтропии.
21. Термодинамические потенциалы.
22. Макро – и микросостояние. Статистический вес.
23. Энтропия.
24. Адиабатный процесс. Политропный процесс.
25. Обратимые и не обратимые процессы. Круговой процесс (цикл).
26. Второе начало термодинамики. Теорема Нернста.
27. Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно и его КПД для идеального газа.
28. Силы и потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия.
29. Уравнение Ван – дер – Ваальса.
30. Изотермы Ван – дер – Ваальса и их анализ.
31. Свойство жидкостей. Поверхностное натяжение.
32. Смачивание. Давление под искривленной поверхностью жидкости.
33. Твердые тела. Моно- и поликристаллы.
34. Типы кристаллических твердых тел. Дефекты в кристаллах.
35. Теплоемкость твердых тел. Модель Эйнштейна и Дебая.
36. Испарение, сублимация, плавление и кристаллизация. Аморфные тела.
37. Явления переноса в термодинамически неравновесных система.
38. Вакуум и методика его получения. Свойства ультраразреженных газов.