

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. В. П. АСТАФЬЕВА»

(КГПУ им. В.П. Астафьева)

Институт математики, физики и информатики

Кафедра физики и методики обучения физике

Пономаренко Дарья Олеговна

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Использование датчиков Vernier в лабораторных работах  
практикума по молекулярной физике.

Направление подготовки 44.03.01 Педагогическое образование  
Направленность (профиль) образовательной программы Физика

ДОПУСКАЮ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

профессор, доктор педагогических наук

В.И. Тесленко

\_\_\_\_\_  
(дата, подпись)

Руководитель

к. ф-м. н., доцент кафедры ФиМОФ

А.С. Чиганов

\_\_\_\_\_  
(дата, подпись)

Дата защиты \_\_\_\_\_

Обучающийся \_\_\_\_\_

(фамилия инициалы)

\_\_\_\_\_  
(дата, подпись)

Оценка \_\_\_\_\_

(прописью)

Красноярск 2019

## СОДЕРЖАНИЕ.

Введение.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА. ЦИФРОВЫЕ ЛАБОРАТОРИИ.....	5
§ 1.1 Использование цифровой лаборатории с датчиками VERNIER на уроках физики.....	5
§ 1.2 Основные положения МКТ.....	8
§ 1.3 Модель идеального газа.....	11
§ 1.4 Понятие температуры. Изопрцессы в идеальном газе.....	12
§ 1.5 Адиабатический процесс.....	15
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗОПРЦЕССОВ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ.....	17
§ 2.1 Проверка закона Шарля (изохорный процесс).....	17
§ 2.2 Проверка закона Бойля-Мариотта (изотермический процесс).....	21
§ 2.3 Измерение длины звуковых волн в воздухе и определение показателя адиабаты.....	26
Заключение.....	32
Список использованных источников.....	34

## ВВЕДЕНИЕ.

В моей работе я рассматриваю процессы молекулярной физики.

В основе молекулярной физики или **молекулярно-кинетической теории** лежат определенные представления о строении вещества. Для установления законов поведения макроскопических систем, состоящих из огромного числа частиц, в молекулярной физике используются различные модели вещества, например, модель идеального газа [1].

Для дальнейшей работы мне необходимо опираться на положения МКТ (молекулярно-кинетической теории).

Молекулярная физика является **статистической** теорией, т. е. теорией, которая рассматривает поведение систем, состоящих из огромного числа частиц (атомов, молекул), на основе вероятностных моделей. Она стремится на основе статистического подхода установить связь между экспериментально измеренными макроскопическими величинами (давление, объем, температура и т.д.) и микроскопическими характеристиками частиц, входящих в состав системы (масса, импульс, энергия и т.д.) [1].

Для экспериментальной реализации и контроля МКТ процессов практически идеально подходит оборудование, реализуемое по технологиям National Instruments, в частности датчиков Vernier.

Целью моего исследования была разработка лабораторных работ для физического практикума в профильных классах старшей школы с использованием датчиков Vernier и технологий National Instruments.

В своей работе я буду в основном опираться на МКТ, привлекая Термодинамику для объяснения экспериментальных фактов.

В отличие от молекулярно-кинетической теории, термодинамика при изучении свойств макроскопических систем не опирается ни на какие представления о молекулярной структуре вещества. Термодинамика является наукой **феноменологической**. Она делает выводы о свойствах вещества на основе законов, установленных на опыте, таких, как закон сохранения энергии. Термодинамика оперирует только с макроскопическими

величинами (давление, температура, объем и т.п.), которые вводятся на основе физического эксперимента. [1]

## **ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА. ЦИФРОВЫЕ ЛАБОРАТОРИИ.**

### **§ 1.1 Использование цифровой лаборатории с датчиками VERNIER на уроках физики.**

В современной жизни невозможно представить отрасль человеческой деятельности без применения информационных технологий, т.е. технологий переработки информации на базе компьютерных вычислительных систем. И все активнее и прочнее они входят в школьное образование. В процесс информатизации в последние годы успешно вовлекаются естественнонаучные дисциплины, в том числе физика, химия, биология. В этих условиях весьма важной представляется организация работы учащихся с цифровыми инструментами различного рода, что обеспечит современное качество образования на основе сохранения его фундаментальности и соответствия актуальным перспективным потребностям личности, общества, государства.

Датчики VERNIER позволяют диагностировать состояние исследуемого объекта. Данные эксперимента обрабатываются и выводятся на экран в реальном масштабе времени и в рациональной графической форме, в виде численных значений, диаграмм, графиков и таблиц. Основное внимание исследователя при этом сосредотачивается не на сборке и настройке экспериментальной установки, а на проектировании различных вариантов проведения эксперимента, накоплении данных, их анализе и интерпретации, формулировке выводов.

Работа с данным оборудованием показывает, что оно не исключает реальный эксперимент, в отличие от большого числа появившихся в

последнее время виртуальных лабораторий, предлагающих компьютерные модели реальных опытов. Такие модели, бесспорно, нужны и важны, но не как замена реального физического опыта, а как его дополнение, т.к. работа проводится с идеальными моделями, и, конечно, для моделирования процессов, которые не могут быть реализованы экспериментально в школьном кабинете.

Для выполнения требований государственного стандарта общего образования выпускник школы должен овладеть основами научного метода познания и экспериментальными умениями и навыками, иметь представление о научном подходе к исследованию явлений природы с использованием новых информационно-коммуникационных технологий. А одна из основных целей обучения в современной школе – вооружить учащегося не столько знаниями, сколько способами овладения ими.

Использование датчиков на уроках позволило расширить диапазон опытов и исследований, рассматривать быстропротекающие процессы, повысить научность проводимых работ.

Цели использования комплекта, состоящего из датчиков VERNIER, согласуются с Национальной образовательной инициативой «Наша новая школа» и могут быть определены следующим образом:

- осуществлять новые подходы к обучению;
- способствовать формированию у учащихся навыков исследовательской деятельности;
- раскрывать творческий потенциал учащихся;
- осуществлять поиск, обработку и анализ информации на современном оборудовании (не исключая при этом традиционных подходов).

Основное направление использования данного комплекта – проектно-исследовательская деятельность учащихся в рамках элективных курсов и факультативов.

Под исследовательской деятельностью учащихся понимается деятельность, связанная с решением творческих, исследовательских задач с заранее неизвестными решениями. Это уникальная деятельность связана с открытием новых для учащихся явлений, связей, закономерностей. Комплект позволяет выполнять естественнонаучные исследования на современном уровне, исследовать действительно интересующие учащихся объекты и явления, позволяет им находить свои варианты решений.

Компактность и мобильность комплекта позволяет применять ее в исследовательских проектах и в походных условиях. Например, можно провести исследование физических параметров реки, используя датчики.

Исследование включает в себя:

- изучение изменения температурного режима речной воды в зависимости от времени суток, от глубины реки, от скорости течения, от структуры дна;
- определение скорости течения реки на разных участках, определение средней скорости течения реки, расчет расхода воды;
- определение изменения температуры, влажности, давления, освещенности в течение дня;
- определение мутности, кислотности воды, количества растворенного кислорода.

В исследовательских проектах обычно принимают участие не все учащиеся, а лишь наиболее мотивированные и способные к такой деятельности. Внеурочная деятельность учащихся хороша тем, что исследования, проводимые ими, не ограничены по времени, поэтому применение датчиков имеет большие возможности.

Небольшой опыт работы с использованием датчиков показал, что ее применение может быть полезно и в практике обычного урока. И применять оборудование такого рода необходимо на разных этапах урока, при использовании различных методов обучения. Демонстрационные опыты, лабораторные работы, экспериментальные задачи могут проводиться и без

новой техники. Однако степень адаптации в современном обществе школьников, которые работают только с приборами прошлого века, будет низкой. Более того, восприятие физики как науки, лежащей в основе современной цивилизации, будет искажено. Да и вероятность встречи современного школьника в дальнейшей жизни даже со стрелочными приборами становится ничтожной по сравнению с вероятностью использования компьютера и устройств с цифровой индикацией измеряемых параметров. Поэтому у всех школьников должно быть представление о работе с аналогичным оборудованием.

Демонстрационный эксперимент при помощи датчика VERNIER может стать более наглядным, ведь явление, воспроизводимое на демонстрационном столе, сопровождается одновременным построением графика зависимости измеряемой датчиком величины от времени.

Одно из направлений использования датчиков – постановка проблемы. Например, при изучении условий плавания тел, показывая плавающую в воде картошку, задаем вопросы: «Почему картошка плавает на поверхности воды?», «Почему тонет, когда доливаем воду?» – и с помощью датчика рН-метра определяем, что при доливании воды изменяется количество соли в воде. При изучении темы «Температура», используя датчик, необходимо ответить на вопрос: « Действительно ли температура поверхности тела составляет 36,6?» Учащиеся измеряют температуру различных участков поверхности своего тела и определяют, что различные участки тела имеют различную температуру, совершенно не равную 36,6.

Методически эффективно использование датчиков для проведения косвенных измерений (Определение относительной влажности воздуха в помещении и вне помещения, измерение оптической плотности объекта, его температуры и т.п.). Например, традиционная лабораторная работа по определению коэффициента трения скольжения может быть расширена определением коэффициента трения покоя. Вместо динамометра используется датчик силы.

В поисках эффективных методов работы каждый учитель выбирает путь, который позволил бы повысить интерес к предмету, получить высокий результат обучения. Использование датчиков VERNIER позволяет «оживить» само содержание предметов естественнонаучного цикла, усилить экспериментальную составляющую; позволяет показать изучаемое явление в педагогически трансформированном виде и тем самым создать необходимую экспериментальную базу для его изучения, проиллюстрировать проявление установленных в науке законов и закономерностей в доступном для учащихся виде, повысить интерес учащихся к изучаемому явлению. [3]

## § 1.2 Основные положения МКТ

*Молекулярно-кинетической теорией* называют учение о строении и свойствах вещества на основе представления о существовании атомов и молекул как наименьших частиц химических веществ.

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три основных положения:

1. Все вещества – жидкие, твердые и газообразные – образованы из мельчайших частиц – молекул, которые сами состоят из атомов («элементарных молекул»). Молекулы химического вещества могут быть простыми и сложными, т.е. состоять из одного или нескольких атомов. Молекулы и атомы представляют собой электрически нейтральные частицы. При определенных условиях молекулы и атомы могут приобретать дополнительный электрический заряд и превращаться в положительные или отрицательные ионы.

2. Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.

3. Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу. Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало.



Молекулярная физика изучает физические свойства макроскопических тел (представляющих собой совокупность большого числа частиц), а также совершающиеся в них физические процессы, обусловленные тепловым движением и взаимодействием микрочастиц (атомов, молекул), составляющих эти тела. [2]

При помощи молекулярно-кинетического метода устанавливаются законы протекания различных физических процессов в макротелах на основе их молекулярной структуры и механизма взаимодействия отдельных молекул между собой [2].

Представление о том, что все тела построены из мельчайших частиц – атомов, было высказано еще в V в. до н. э. греческим философом Демокритом. Эта теория основана на следующих положениях [2]

1. Все вещества состоят из очень маленьких отдельных частиц – молекул.

Молекулы в свою очередь состоят из еще более мелких частиц – атомов. Различные комбинации из атомов и создают все множество видов молекул. Атомы также не являются пределом делимости вещества, а представляют собой весьма сложные образования, состоящие из электрически положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженной электронной оболочкой.

2. Между молекулами тела одновременно действуют силы взаимного притяжения и силы взаимного отталкивания.

Силы межмолекулярного взаимодействия имеют электрическую природу, обусловленную тем, что молекулы состоят из электрически заряженных частиц (положительных – атомных ядер и отрицательных – электронов), которым, как известно, свойственно притяжение – для разноименно заряженных и отталкивание – для одноименно заряженных частиц.

3. Молекулы, образующие тело, находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения.

При этом молекулы сталкиваются друг с другом и изменяют свою скорость, как по направлению, так и по величине. Размеры и масса молекулы возрастают с увеличением числа атомов, которые входят в её состав. Атомы и молекулы (кроме многоатомных молекул органических веществ) имеют массу порядка  $10^{-26}$  кг. Из-за малых значений выражать массы атомов и молекул в килограммах (кг) неудобно. Поэтому для измерения масс молекул в химии и физике используют атомную единицу массы (а. е. м.). [2].

Атомную единицу массы выражают через массу изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ .

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_{0\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \quad (1)$$

Массу молекулы (атома), выраженную в атомных единицах массы, называют относительной молекулярной (атомной) массой и обозначают символом  $M_r$ . Относительная молекулярная (атомная) масса  $M_r$  показывает, во сколько раз масса молекулы (атома) больше атомной единицы массы:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}} \quad (2)$$

*Количество вещества*  $\nu$  определяют отношением числа частиц этого вещества  $N$  к постоянной Авогадро  $N_A$ :

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad (3)$$

*Постоянная Авогадро*:  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

В молекулярно-кинетической теории наряду с относительной молекулярной (атомной) массой  $M_r$  используют молярную массу  $M$ .

*Молярная масса* — масса вещества, взятого в количестве  $\nu = 1$  моль. Молярную массу  $M$  определяют отношением массы  $m$  вещества к его количеству  $\nu$ :

$$M = \frac{m}{\nu} \quad (4)$$

Молярная масса вещества связана с его относительной молекулярной (атомной) массой следующим соотношением:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \quad (5)$$

### § 1.3 Модель идеального газа

Для лучшего понимания моей дальнейшей работы и объяснения моих экспериментов, мне необходимо ввести понятие Идеального газа.

*Идеальный газ* — модель газа, удовлетворяющая следующим условиям:

1) молекулы газа можно считать материальными точками, которые хаотически движутся;

2) силы взаимодействия между молекулами идеального газа практически отсутствуют (потенциальная энергия взаимодействия равна нулю); они действуют только при прямых столкновениях молекул, причём это силы отталкивания.

Уравнение, связывающее микропараметры состояния идеального газа (массу молекулы и её среднюю квадратичную скорость  $\langle U_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle U^2 \rangle}$ ) с его макропараметром (давлением, характеризующим газ как целое), непосредственно измеряемым на опыте, называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle U^2 \rangle$$

Давление идеального газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения его молекул и их концентрации:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{к}} \rangle$$

Тепловым равновесием называют такое состояние изолированной физической системы, при котором все её макроскопические параметры остаются неизменными с течением времени. В состоянии теплового равновесия температура различных частей физической системы одинакова. [2].

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$$

Средняя квадратичная скорость молекул газа

$$\langle U_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

## § 1.4 Понятие температуры. Изопроецессы в идеальном газе

Давление идеального газа прямо пропорционально концентрации его молекул и абсолютной температуре газа: [2]

$$p = nkT$$

Температурную шкалу, не зависящую от рода вещества, называют абсолютной термодинамической шкалой температур (шкалой Кельвина). Температура по шкале Кельвина ( $T$ ) приближённо связана с температурой по шкале Цельсия ( $t$ ) соотношением

$$T = t + 273$$

Давление смеси химически не реагирующих между собой разреженных газов равно сумме парциальных давлений каждого из газов (закон Дальтона):  $p = p_1 + p_2 + \dots + p_i$ , где парциальное давление — давление газа, входящего в состав газовой смеси, если бы он один занимал весь объём, предоставленный смеси, при той же температуре. [2]

*Изопроецессы идеального газа – проецессы, при которых один из параметров остаётся неизменным.*

- **Изохорный проецесс.** Закон Шарля.  $V = \text{const}$ .

*Изохорным проецессом называется проецесс, протекающий при постоянном объёме  $V$ . Поведение газа при этом изохорном проецессе подчиняется закону Шарля:  $P/T = \text{const}$ , который формулируется так: «При постоянном объёме и неизменных значениях массы газа и его молярной*

массы, отношение давления газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным».

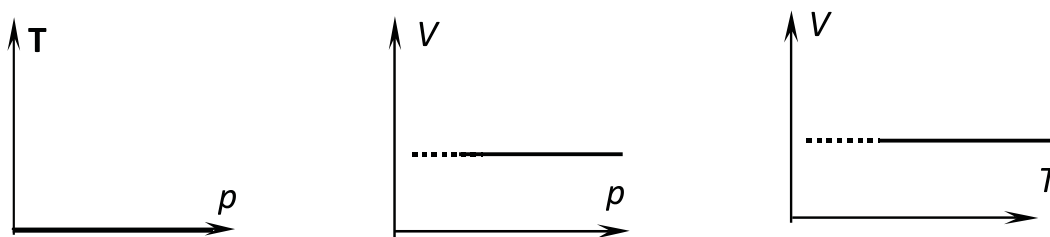


Рис. 1.

Уравнение изохоры:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Если температура газа выражена в градусах Цельсия, то уравнение изохорического процесса записывается в виде

$$p = p_0(1 + \alpha t),$$

где  $p_0$  – давление при  $0^\circ\text{C}$  по Цельсию;  $\alpha$  – температурный коэффициент давления газа равен  $1/273 \text{ град}^{-1}$

График такой зависимости на  $PT$  диаграмме имеет вид:

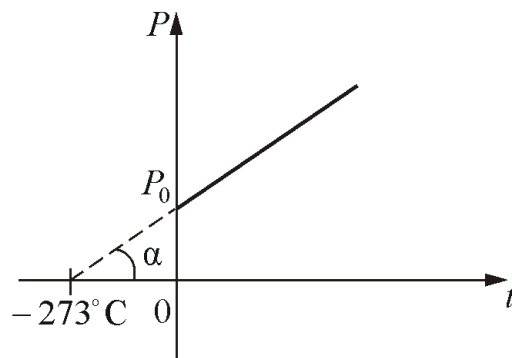


Рис. 2.

- **Изобарный процесс. Закон Гей-Люссака.  $P = \text{const.}$**

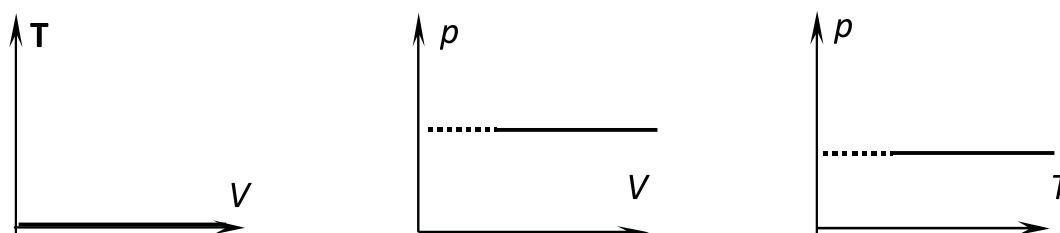


Рис. 3.

**Изобарным** процессом называется процесс, протекающий при **постоянном давлении**  $P$ . Поведение газа при изобарном процессе подчиняется закону Гей-Люссака:  $V/T = \text{const}$ , который формулируется так: «При постоянном давлении и неизменных значениях массы и газа и его молярной массы, отношение объёма газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным».

Уравнение изобары:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Если температура газа выражена в градусах Цельсия, то уравнение изобарического процесса записывается в виде

$$V = V_0(1 + \alpha t),$$

где  $\alpha = 1/273 \text{ град}^{-1}$  – температурный коэффициент объёмного расширения.

График такой зависимости на  $Vt$  диаграмме имеет вид:

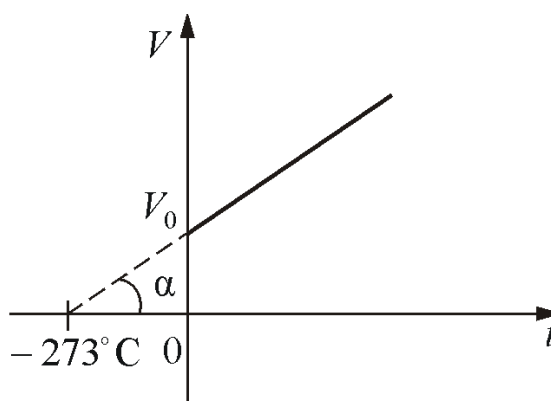


Рис. 4.

- **Изотермический процесс. Закон Бойля-Мариотта.**  $T = \text{const}$ .

**Изотермическим** процессом называется процесс, протекающий при **постоянной температуре**  $T$ . Поведение идеального газа при изотермическом процессе подчиняется закону Бойля-Мариотта:  $PV = \text{const}$ ,

который формулируется так: «При постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, произведение объёма газа на его давление остаётся постоянным».

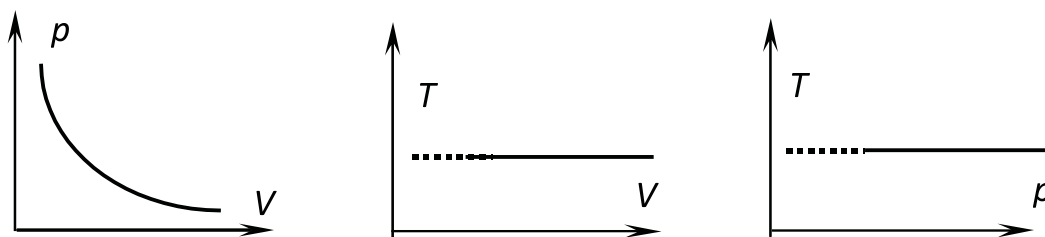


Рис. 5.

Уравнение изотермы

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

### § 1.5 Адиабатический процесс.

*Адиабатический процесс* (изоэнтропийный). *Адиабатический процесс* – термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Для реализации адиабаты удобно использовать звуковую трубу со стационарными звуковыми волнами изменяемой длины.

**Звуковыми волнами** или просто **звуком** принято называть волны, воспринимаемые человеческим ухом. Диапазон звуковых частот лежит в пределах приблизительно от 20 Гц до 20 кГц. Волны с частотой менее 20 Гц называются *инфразвуком*, а с частотой более 20 кГц – *ультразвуком*. Волны звукового диапазона могут распространяться не только в газе, но и в жидкости (продольные волны) и в твердом теле (продольные и поперечные волны). Однако волны в газообразной среде – среде нашего обитания – представляют особый интерес. Изучением звуковых явлений занимается раздел физики, который называют *акустикой*.

При распространении звука в газе атомы и молекулы колеблются вдоль направления распространения волны. Это приводит к изменениям локальной

плотности  $\rho$  и давления  $p$ . Звуковые волны в газе часто называют волнами плотности или волнами давления.

Соотношения между длиной волны  $\lambda$ , скоростью звука  $v$  и периодом  $T$  следующие:

$$v = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T}$$

где  $\nu$  – частота звуковой волны.

Важной характеристикой звуковых волн является **скорость их распространения**. Она определяется инертными и упругими свойствами среды. Скорость звука при **нормальных условиях** (т. е. при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении 1 атм) равна 331,5 м/с, а скорость звука при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 1 атм равна 343 м/с. Французский ученый П. Лаплас показал, что сжатие и разрежение газа в звуковой волне происходят по **адиабатическому закону**, т. е. без влияния теплопроводности. Формула Лапласа (1816 г.) имеет вид:

$$v = \gamma \cdot \frac{p}{\rho},$$

где  $p$  – среднее давление в газе,  $\rho$  – средняя плотность,  $\gamma$  – некоторая константа, зависящая от свойств газа. Для двухатомных газов  $\gamma = 1,4$ . Расчет скорости звука по формуле Лапласа дает значение  $v = 332$  м/с (при нормальных условиях).

В термодинамике доказывается, что коэффициент  $\gamma$  равен отношению теплоемкостей при постоянном давлении  $C_p$  и при постоянном объеме  $C_v$ .

Трубы духовых инструментов являются **акустическими резонаторами**, то есть акустическими колебательными системами, способными возбуждаться (резонировать) от звуковых волн определенных частот. При определенных условиях в воздухе внутри труб возникают стоячие звуковые волны. На Рис. 1 показаны несколько типов стоячих волн (мод) в органной трубе, закрытой с одного конца и открытой с другого.



## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗОПРОЦЕССОВ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ.

### § 2.1 Проверка закона Шарля (изохорный процесс).

Для экспериментальной проверки закона Шарля для идеального газа, мною была разработана лабораторная работа.

Лабораторная работа 1.

**Цель работы:** Получить закон Шарля, доказать прямую зависимость давления от температуры ( $p/T = \text{const}$ ).

**Оборудование:** Сосуд постоянного объема 265 мл, полиэтиленовая трубка длина 45см и объемом 2 мл, нагреватель (электрический чайник), элементы крепления (штатив, лапки и т. д.), датчик давления, датчик температуры, блок сбора данных, компьютер, программное обеспечения для обработки данных LabVIEW.

#### *Теоретическая часть.*

Соотношение  $p = nkT$ , связывающее давление газа с его температурой и концентрацией молекул, получено для модели идеального газа, молекулы которого взаимодействуют между собой и со стенками сосуда только во время упругих столкновений. Это соотношение может быть записано в другой форме, устанавливающей связь между макроскопическими параметрами газа – объемом  $V$ , давлением  $p$ , температурой  $T$  и количеством вещества  $n$ . Для этого нужно использовать равенства

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V} = \frac{m}{M} \frac{N_A}{V}.$$

Здесь  $N$  – число молекул в сосуде,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $m$  – масса газа в сосуде,  $M$  – молярная масса газа. В итоге получим:

$$pV = \nu N_A kT = \frac{m}{M} N_A kT.$$

Произведение постоянной Авогадро  $N_A$  на постоянную Больцмана  $k$  называется **универсальной газовой постоянной** и обозначается буквой  $R$ . Ее численное значение в СИ есть:  $R = 8,31 \text{ Дж/моль К}$ .

Соотношение

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT.$$

называется **уравнением состояния идеального газа**. [1]

**Изохорный процесс** ( $V = \text{const}$ ) – это процесс квазистатического нагревания или охлаждения газа при постоянном объеме  $V$  и при условии, что количество вещества  $\nu$  в сосуде остается неизменным. Как следует из уравнения состояния идеального газа, при этих условиях давление газа  $p$  изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре:  $p \sim T$  или

$$\frac{p}{T} = \text{const}.$$

На плоскости  $(p, T)$  изохорные процессы для заданного количества вещества  $\nu$  при различных значениях объема  $V$  изображаются семейством прямых линий, которые называются **изохорами**. Большим значениям объема соответствуют изохоры с меньшим наклоном по отношению к оси температур (Рис. 6.).

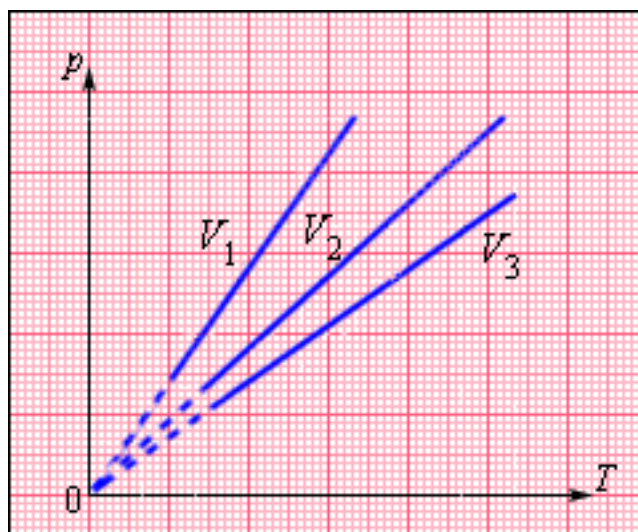


Рис. 6. Семейство изохор на плоскости ( $p, T$ ).

$$V_3 > V_2 > V_1$$

Экспериментально зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Ж. Шарль (1787 г.). Поэтому уравнение изохорного процесса называется **законом Шарля**. [1]

### *Методика измерений.*

Нагревание сосуда постоянного объема с одновременным измерением давления и температуры воздуха внутри сосуда. Построение зависимости давления газа от температуры, определение вида зависимости и подтверждение закона Шарля.



Рис. 7. Установка для проверки закона Шарля.

### *Ход работы.*

1. Соединяем сосуд с датчиком давления полиэтиленовой трубкой.
2. Помещаем сосуд в нагреватель (чайник с набранной водой так чтобы сосуд погружался полностью).
3. Прикрепляем датчик температуры поверхности на поверхность стеклянного объема (в верхней его части).
4. Датчики соединяем с прибором сбора данных, который подсоединен к компьютеру (Рис. 7).
5. Включаем компьютер и запускаем программу **LabVIEW**.
6. Устанавливаем модули: сбора данных, графический ( $P(t)$ ) и ( $T(t)$ ), вывода числовых данных (температуры и давления).
7. Подключаем режимы графический и вывода числовых данных к модулю сбора данных.
8. Строим таблицу для занесение данных.
9. Включаем чайник и снимаем показания температуры и давления.
10. Производим вычисления  $P/T$ .
11. Сделать вывод из расчетов, таблицы и графика.

Таблица 1.

№	Нагрев, t (с)	Температура T, К	Давление P, кПа	$P/T$ – вычисления	Отклонение $P/T$
1	0	293,95	100,49	$34,186 \cdot 10^3$	$0,331 \cdot 10^3$
2	50	298,95	102,03	$34,129 \cdot 10^3$	$0,274 \cdot 10^3$
3	100	305,65	103,49	$33,859 \cdot 10^3$	$0,004 \cdot 10^3$
4	150	310,95	105,03	$33,777 \cdot 10^3$	$0,078 \cdot 10^3$
5	200	314,65	106,57	$33,869 \cdot 10^3$	$0,014 \cdot 10^3$
6	250	319,55	108,07	$34,346 \cdot 10^3$	$0,509 \cdot 10^3$
7	300	325,45	109,59	$33,673 \cdot 10^3$	$0,182 \cdot 10^3$
8	350	330,35	111,07	$33,632 \cdot 10^3$	$0,223 \cdot 10^3$
9	400	334,95	112,80	$33,677 \cdot 10^3$	$0,178 \cdot 10^3$
10	450	339,95	114,32	$33,628 \cdot 10^3$	$0,227 \cdot 10^3$

11	500	344,75	115,94	$33,630 \cdot 10^3$	$0,225 \cdot 10^3$
				Ср.	$33,855 \cdot 10^3$
					$0,204 \cdot 10^3$ (0,6 %)

### *Задание*

1. Зная объем воздуха в сосуде, вычислить массу воздуха.
2. Вычислите количество вещества используя табличные значения молярной массы.
3. Вычислите константу для изохорного процесса.

## § 2.2 Проверка закона Бойля-Мариотта (изотермический процесс).

Для проверки закона Бойля-Мариотта для идеального газа, я разработала следующую лабораторную работу.

### Лабораторная работа 2.

**Цель работы:** Получить закон Бойля-Мариотта, доказать гиперболическую зависимость давления от температуры ( $pV = \text{const.}$ ).

**Оборудование:** Шприц диаметром 160 см<sup>3</sup>, система фиксации шприца, блок сбора данных, компьютер, программное обеспечение для обработки данных LabVIEW.

### *Теоретическая часть.*

Соотношение  $p = nkT$ , связывающее давление газа с его температурой и концентрацией молекул, получено для модели идеального газа, молекулы которого взаимодействуют между собой и со стенками сосуда только во время упругих столкновений. Это соотношение может быть записано в другой форме, устанавливающей связь между макроскопическими параметрами газа – объемом  $V$ , давлением  $p$ , температурой  $T$  и количеством вещества  $n$ . Для этого нужно использовать равенства

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V} = \frac{m}{M} \frac{N_A}{V}. \quad (6)$$

Здесь  $N$  – число молекул в сосуде,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $m$  – масса газа в сосуде,  $M$  – молярная масса газа. В итоге получим:

$$pV = \nu N_A kT = \frac{m}{M} N_A kT. \quad (7)$$

Произведение постоянной Авогадро  $N_A$  на постоянную Больцмана  $k$  называется **универсальной газовой постоянной** и обозначается буквой  $R$ . Ее численное значение в СИ есть:  $R = 8,31 \text{ Дж/моль К}$ .

Соотношение

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT. \quad (8)$$

называется **уравнением состояния идеального газа**. [1]

### **Изотермический процесс ( $T = \text{const}$ )**

**Изотермическим процессом** называют квазистатический процесс, протекающий при постоянной температуре  $T$ . Из уравнения (8) состояния идеального газа следует, что при постоянной температуре  $T$  и неизменном количестве вещества  $\nu$  в сосуде произведение давления  $p$  газа на его объем  $V$  должно оставаться постоянным:

$$pV = \text{const}.$$

На плоскости  $(p, V)$  изотермические процессы изображаются при различных значениях температуры  $T$  семейством гипербол  $p \sim 1/V$ , которые называются **изотермами**. Так как коэффициент пропорциональности в этом соотношении увеличивается с ростом температуры, изотермы, соответствующие более высоким значениям температуры, располагаются на графике выше изотерм, соответствующих меньшим значениям температуры (рисунок 8). Уравнение изотермического процесса было получено из эксперимента английским физиком Р. Бойлем (1662 г.) и независимо французским физиком Э. Мариоттом (1676 г.). Поэтому это уравнение называют **законом Бойля–Мариотта**. [1]

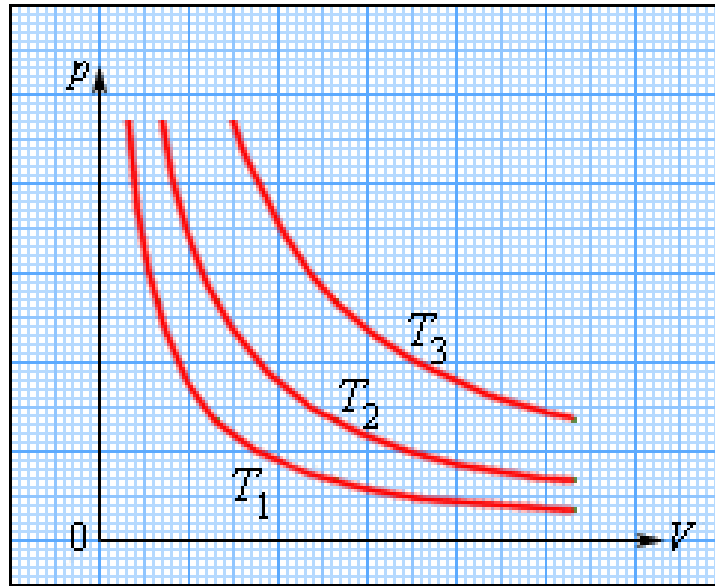


Рис. 8. Семейство изотерм на плоскости  $(p, V)$ .

$$T_3 > T_2 > T_1$$

*Методика измерений.*

Измерение давления и объёма воздуха при постоянной температуре. Построение зависимости давления от температуры и подтверждение закона Бойля-Мариотта. [2]

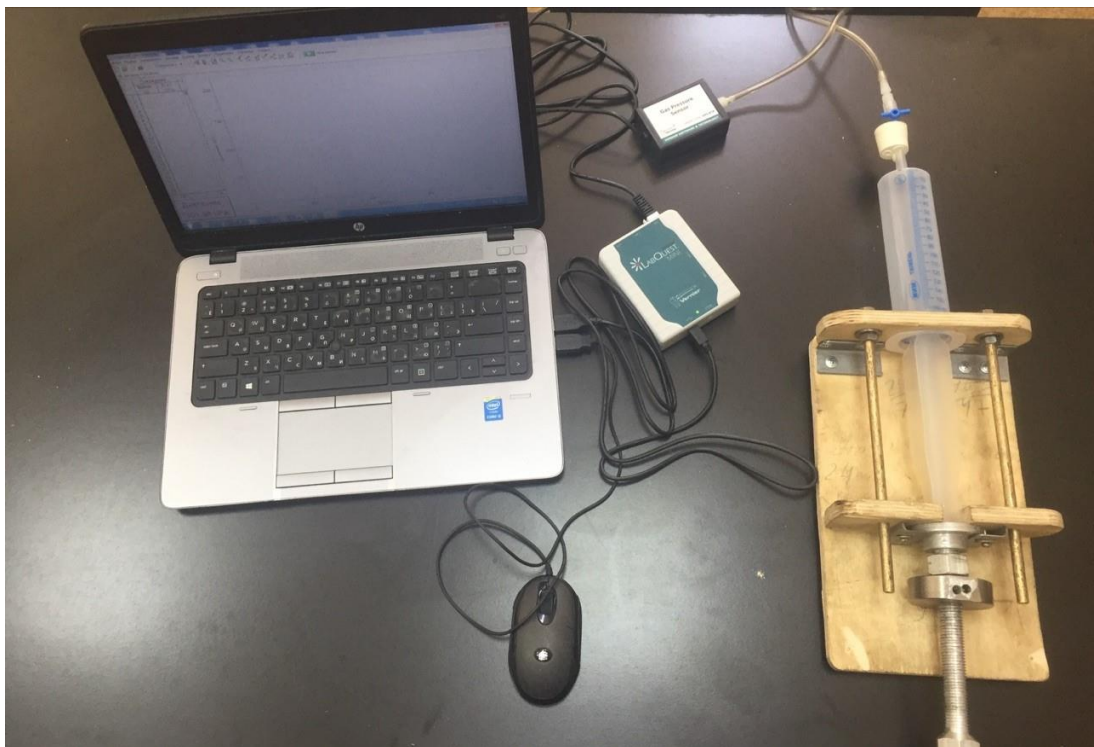


Рис. 9. Установка в сборе.

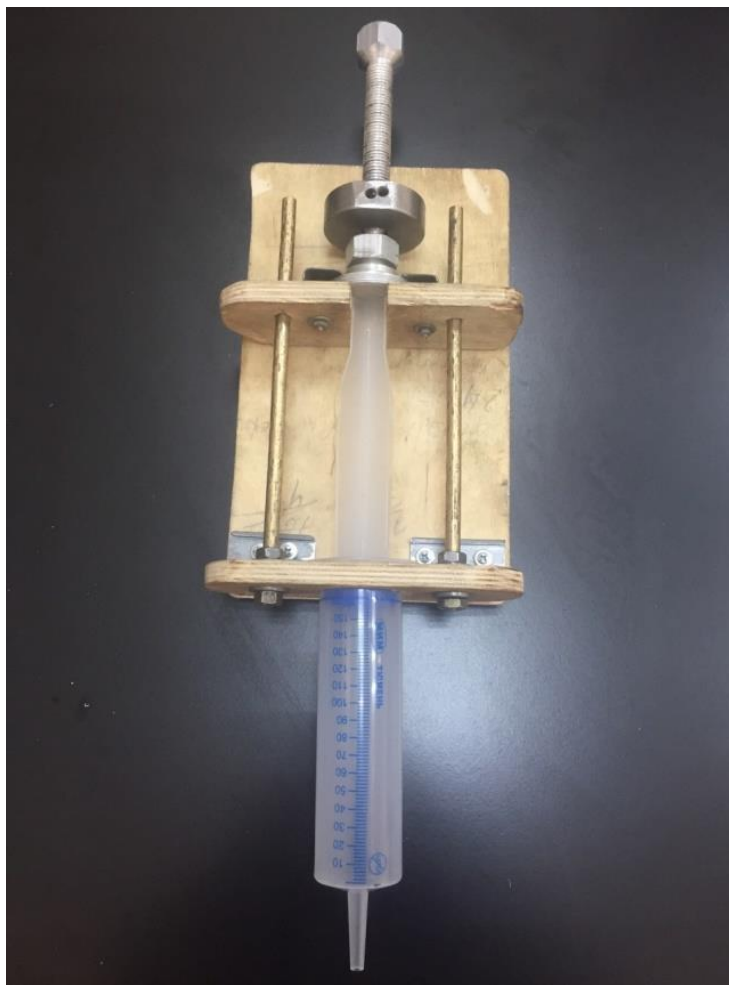


Рис.10. Для аппаратного обеспечения лабораторной работы было разработано и изготовлено специальное устройство для фиксации объема шприца.

### *Ход работы.*

1. Соединяем шприц с системой фиксации шприца (Рис.10).
2. Соединяем с прибором сбора данных, который подсоединён к компьютеру.
3. Включаем компьютер и запускаем программу **LabVIEW**.
4. Устанавливаем модули: сбора данных, графический ( $P$  и  $V$ ), вывода числовых данных (давления и объёма).
5. Подключаем режимы графический и вывода числовых данных к модулю сбора данных.
6. Строим таблицу для занесение данных.



7. Изменяем объём и снимаем показания давления.
8. Производим вычисления.
9. Сделать вывод из расчетов, таблицы и графика.

Таблица 2.

	Температура, t (С)	Давление P, кПа	Объём V, см <sup>3</sup>	PV- вычисления
1	20	99,87	160	15979,2
2	20	105,42	150	15813
3	20	112,41	140	15737,4
4	20	120,87	130	15713,1
5	20	130,57	120	15668,4
6	20	141,71	110	15588,1
7	20	154,18	100	15418
8	20	169,99	90	15299,1
9	20	189,49	80	15159,2

### *Задание*

1. Зная объём воздуха в сосуде, вычислить массу воздуха.
2. Вычислите количество вещества используя табличные значения молярной массы.
3. Вычислите константу для изотермического процесса.

### § 2.3 Измерение длины звуковых волн в воздухе и определение показателя адиабаты.

Лабораторная работа 3.

**Цель работы:** измерение длины звуковых волн резонансным методом, определение скорости звука в воздухе и термодинамического отношения теплоемкостей.

**Приборы и принадлежности:** звуковой генератор ГЗ-118, датчик звука (микрофон), звуковая труба с установленным в торце телефоном и подвижным поршнем с микрофоном, компьютер с установленной программой LabQuest и LabVIEW.

#### **Теоретическая часть.**

**Звуковыми волнами** или просто **звуком** принято называть волны, воспринимаемые человеческим ухом. Диапазон звуковых частот лежит в пределах приблизительно от 20 Гц до 20 кГц. Волны с частотой менее 20 Гц называются **инфразвуком**, а с частотой более 20 кГц – **ультразвуком**. Волны звукового диапазона могут распространяться не только в газе, но и в жидкости (продольные волны) и в твердом теле (продольные и поперечные волны). Однако волны в газообразной среде – среде нашего обитания – представляют особый интерес. Изучением звуковых явлений занимается раздел физики, который называют **акустикой**.

При распространении звука в газе атомы и молекулы колеблются вдоль направления распространения волны. Это приводит к изменениям локальной плотности  $\rho$  и давления  $p$ . Звуковые волны в газе часто называют волнами плотности или волнами давления.

Соотношения между длиной волны  $\lambda$ , скоростью звука  $v$  и периодом  $T$  следующие:

$$v = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T};$$

где  $\nu$  – частота звуковой волны.

Важной характеристикой звуковых волн является **скорость их распространения**. Она определяется инертными и упругими свойствами среды. Скорость звука при **нормальных условиях** (т. е. при температуре 0 °С и давлении 1 атм) равна 331,5 м/с, а скорость звука при температуре 20 °С и давлении 1 атм равна 343 м/с. Французский ученый П. Лаплас показал, что сжатие и разрежение газа в звуковой волне происходят по **адиабатическому закону**, т. е. без влияния теплопроводности. Формула Лапласа (1816 г.) имеет вид:

$$v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}},$$

где  $p$  – среднее давление в газе,  $\rho$  – средняя плотность,  $\gamma$  – некоторая константа, зависящая от свойств газа. Для двухатомных газов  $\gamma = 1,4$ . Расчет скорости звука по формуле Лапласа дает значение  $v = 332$  м/с (при нормальных условиях).

В термодинамике доказывается, что коэффициент  $\gamma$  равен отношению теплоемкостей при постоянном давлении  $C_p$  и при постоянном объеме  $C_v$ .

Трубы духовых инструментов являются **акустическими резонаторами**, то есть акустическими колебательными системами, способными возбуждаться (резонировать) от звуковых волн определенных частот. При определенных условиях в воздухе внутри труб возникают стоячие звуковые волны. На Рис. 1 показаны несколько типов стоячих волн (мод) в органной трубе, закрытой с одного конца и открытой с другого.

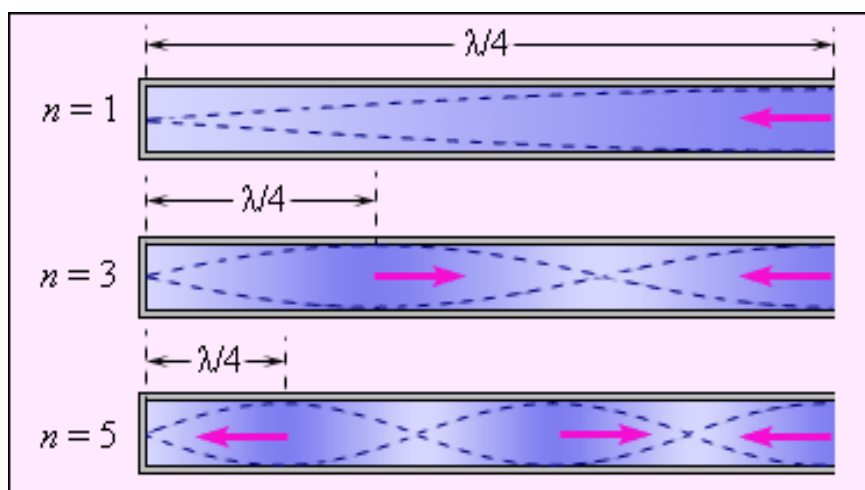


Рис. 11. Стоячие волны в трубе, закрытой с одного конца и открытые с другого. Показана длина волны, видно, что длина волны равна удвоенному расстоянию между ближайшими пучностями.

### *Методика измерений.*

Установите на генераторе необходимую частоту сигнала из таблицы 3. Для этого служат три переключателя в центре прибора и множитель в левой нижней части прибора (Рис. 13). Установите микрофон на минимальном расстоянии от телефона и измерьте частоту сигнала, при этом ручку «амплитуда» поставьте в минимальное положение. Затем, передвигая находящийся внутри звуковой трубы поршень с микрофоном, определяем положения, в которых амплитуда сигнала максимальна (Рис. 12)



Рис. 12. Общий вид установки.

Наименьшее расстояние принимаем в качестве половины длины волны (Рис. 11). Произведя измерения на звуковой трубе, изменяем значение частоты генератора и повторяют весь цикл измерений. Измерения необходимо произвести для 3-х-5-ти частот, в интервале от 200 до 1400 Гц. Систематическая ошибка в определении частоты на данном приборе будет равна  $\Delta\nu = (\text{половине цены деления прибора}) \times (\text{множитель})$ .



Рис. 13. Звуковой генератор ГЗ-118.

### *Ход работы.*

Таблица 3.

№	$\nu$ ,	$\Delta\nu$ ,	$\lambda$ ,	$\Delta\lambda$ ,	$\nu$ ,	$\gamma$ ,
	Гц		$10^{-2}$ м		м/с	
1	500	5	66	0,5	330	1,30
2	800		43		344	1,41
3	1000		35		350	1,46
Ср.	766,7				341,33	1,39

Для каждой частоты найдем значение скорости по формуле:

$$\nu = \lambda \cdot \nu,$$

где  $\lambda$  - длина волны, определяемая с помощью шкалы, укрепленной на подвижном поршне, а  $\nu$  - частота колебаний, задаваемых звуковым генератором.

Также скорость звуковой волны, распространяющейся в трубе, зависит от давления воздуха и его плотности и определяется соотношением

$$v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}},$$

где  $\gamma$  - показатель адиабаты Пуассона, уравнение которой может быть записано в виде:

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = const,$$

Кроме того, известно, что величина  $\gamma$  связана с теплоемкостями газа(воздуха)  $c_p$  и  $c_v$  соотношением:  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ,  $\gamma = \frac{i+2}{i}$ ,

где  $i$  – число степеней свободы молекул газа.

$$\text{Отсюда следует: } v = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}, \quad v^2 = \gamma \cdot \frac{p}{\rho} \Rightarrow \gamma = v^2 \cdot \frac{\rho}{p}$$

Из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}, \quad \text{где } p = 10^5 \text{ Па}, T = 293 \text{ К.}$$

$$v = \lambda \cdot \nu \Rightarrow \ln v = \ln \lambda + \ln \nu$$

$$\frac{v_{cp}}{\Delta v_{cp}} = \sigma_v = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} + \frac{\nu}{\Delta \nu} = 249$$

$$\Delta v_{cp} = v_{cp} / \sigma_v = 1,37 \text{ м/с};$$

Окончательный результат для скорости звука записываем в виде:

$$v = v_{cp} \pm \Delta v_{cp}; \quad v = (341,33 \pm 1,37) \text{ м/с};$$

$$\text{Показатель адиабаты - } \gamma = v^2 \cdot \frac{\rho}{p} = \lambda^2 \nu^2 \cdot \frac{\rho}{p};$$

$$\frac{\gamma_{cp}}{\Delta \gamma_{cp}} = \sigma_\gamma = 2 \frac{\lambda}{\Delta \lambda} + 2 \frac{\nu}{\Delta \nu} = 498; \quad \Delta \gamma_{cp} = \gamma_{cp} / \sigma_\gamma = 0,003;$$

Окончательный результат для адиабаты записываем в виде:

$$\gamma = \gamma_{cp} \pm \Delta \gamma_{cp}; \quad \gamma = 1,390 \pm 0,003;$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i} \Rightarrow i = 5; \quad c_v = \frac{i}{2} \cdot R = 20,75; \quad c_p = \frac{i+2}{2} \cdot R = 29,05.$$

**Вывод:** измерили длины звуковых волн резонансным методом, определили скорости звука в воздухе и термодинамическое отношение теплоемкостей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Молекулярная физика и термодинамика – это по существу две разные по своим подходам, но тесно связанные науки, занимающиеся одним и тем же – изучением макроскопических свойств физических систем, но совершенно разными методами.

В работе рассматривались процессы молекулярной физики. В основе молекулярной физики или молекулярно-кинетической теории (МКТ) лежат определенные представления о строении вещества. Для установления законов поведения макроскопических систем, состоящих из огромного числа частиц, в молекулярной физике используются различные модели вещества, например, модель идеального газа.

Молекулярная физика является статистической теорией, т. е. теорией, которая рассматривает поведение систем, состоящих из огромного числа частиц (атомов, молекул), на основе вероятностных моделей. Она стремится на основе статистического подхода установить связь между экспериментально измеренными макроскопическими величинами (давление, объем, температура и т.д.) и микроскопическими характеристиками частиц, входящих в состав системы (масса, импульс, энергия и т. д.). [1]

В отличие от молекулярно-кинетической теории, термодинамика при изучении свойств макроскопических систем не опирается ни на какие представления о молекулярной структуре вещества. Термодинамика является наукой феноменологической. Она делает выводы о свойствах вещества на основе законов, установленных на опыте, таких, как закон сохранения энергии. Термодинамика оперирует только с макроскопическими величинами (давление, температура, объем и т.п.), которые вводятся на основе физического эксперимента.

Целью работы являлась разработка методического пособия и практических рекомендаций для проведения учебного физического экспериментального практикума по молекулярной физике с использованием компьютера в качестве универсального измерительного прибора.



Апробация основных результатов данной работы осуществлялась в рамках XX Международного научно-практического форума «Молодёжь и наука» на 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Современная физика в системе школьного и вузовского образования».

## Список использованных источников

1. Под редакцией профессора МФТИ С. М. Козела «Открытая физика 2.7, Часть 1». – М. 1996-2013.
2. учеб. пособие для 10-го кл. учреждений общ. сред. образования/ Е. В. Громыко – Минск, 2013.
3. Организация проектной и исследовательской деятельности учащихся с использованием датчиков Vernier[<https://infourok.ru/organizaciya-proektnoy-i-issledovatel'skoy-deyatelnosti-uchaschihsya-s-ispolzovaniem-datchikov-vernier-2863152.html>].
4. Физический практикум с использованием датчиков Vernier и технологий National instruments / А.С.Чиганов, С.В.Бортновский, С.В.Латынцев, Н.В.Прокопьева; Краснояр.гос.пед.ун-т им. В.П.Астафьева.- Красноярск, 2018.-88с.
5. Кикоин, А.К. Молекулярная физика: Учебное пособие/А.К.Кикоин, И.К.Кикоин.-СПб.:Лань,2014.-480с.
6. Никеров, В.А. Физика для вузов: механика и молекулярная физика: Учебник/В.А.Никеров.-М.:Дашков и К,2015.-136с.
7. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика: Учебное пособие в 5 т./Д.В.Сивухин.- М.: Физматлит, 2014.-544с.
8. Степин, П.А. Курс общей физики: Учебное пособие в 3 т. Т.1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны/П.А.Степин.-СПб.: Лань КПП, 2016.-352с.
9. Стуколкин, Л.П. Молекулярная физика: Учебное пособие/Л.П.Стуколкин.-СПб.:Лань П, 2016.-480с.
10. Уайт, А. Молекулярная физика: Учебное пособие/А. Уайт.-СПб.: Лань П, 2016.-368с.
11. Больцман, Людвиг. Избранные труды. Молекулярно-кинетическая теория газов. Термодинамика. Статистическая механика.

Общие вопросы физики: сборник научных трудов/Л.Больцман; отв.исполн.,ред.Л.С.Полак.- М.: Наука, 1984.-598с.

12. Баканина, Л.П. Сборник задач по физике: учебное пособие для углубленного изуч. физики в 10-11 классах общеобразов. учреждений/ Л.П.Баканина, В.Е.Белонучкин, С.М.Козел: ред. С.М.Козела.-М.: Просвещение, 1995.-176с.

13. Бордовский, Г.А. Физика: учебное пособие для студентов фак. естествознания пед. ин-тов /Г.А.Бордовский: ред. И.М.Бронштейна.-Л.: Ленинградский гос. пед. ин-т им.А.И.Герцена, 1973.-216с.

14. Касьянов, В.А. Физика.10 кл.: учебник для общеобраз. учеб. заведений./ В.А.Касьянов.-5-е изд., стереотип.-М.: Дрофа,2003.-416с.

15. Пурышева, Н.С. Фундаментальные эксперименты в физической науке. Элективный курс: учеб. пособие/Н.С.Пурышева, Н.В.Шаронова, Д.А.Исаев.-М.:Бином. Лаборатория Знаний, 2005.-159с.

16. Орлов,В.А. Лабораторный практикум по молекулярной физике: практикум/В.А.Орлов, С.И.Смирнов.- Красноярск: РИО КГПУ, 2002.-174с.

17. Гершензон, Е.М. Молекулярная физика: учебное пособие для студентов пед. вузов/Е.М.Гершензон, Н.Н.Малов, А.Н.Мансуров.- М.:Академия, 2000.-272с.

18. Шебалин, О.Д. Молекулярная физика: учебное пособие для студентов матем. фак. пед. ин-тов/О.Д.Шебалин.- М.: Высш. шк., 1978.-167с.

19. Кикоин, А.К. Молекулярная физика: учебное пособие для физич. ин-тов и фак-в/А.К.Кикоин, И.К.Кикоин.-М.: Гос. изд-во физ. мат. лит-ры, 1963.-500с.

20. Бейзер, А. Основные представления современной физики: научное издание/А.Бейзер: пер. с англ.: А.Г.Беды, А.В.Давыдова.- М.: Атомиздат,1973.-548с.

21. Хижнякова, Л.С. Физика. Механика. Термодинамика и молекулярная физика: учеб. для 7-8 кл. общеобр. учр./Л.С.Хижнякова, А.А.Синявина.-М.: Вита-Пресс, 2000.-256с.

22. Мякишев, Г.Я. Физика: Молекулярная физика. Термодинамика. 10 кл.: учеб. для улубл. изучения физики.-5-е изд./Г.Я.Мякишев, А.З.Синяков.-М.: Дрофа, 2002.-352с.
23. Лабораторный практикум по физике: учебное пособие для студентов вузов/А.С.Ахматов, В.М.Андреевский, А.И.Кулаков и др.; Ред. А.С.Ахматова.-М.: Высш. шк., 1980.-360с.
24. Методика преподавания физики в средней школе. Молекулярная физика. Основы электродинамики: пособие для учителя/С.Я.Шамаш, В.А.Орлов, Э.Е.Эвенчик и др.; Ред. С.Я.Шамаш.- М.: ПРОСВЕЩЕНИЕ, 1975.-256с.
25. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: учебное пособие для вузов. Т.2 Термодинамика и молекулярная физика/Д.В.Сивухин.-3-е изд. испр. И доп.- М.: Наука, 1990.-592с.
26. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов/Т.И.Трофимова.-3-е изд., испр.- М.: Высш. шк., 1994.-542с.
27. Мякишев, Г.Я. Физика: учебник для 10 кл. сред. шк./Г.Я.Мякишев, Б.Б.Буховцев.- М.: Просвещение, 1990.-223с.
28. Лабораторный практикум по физике: учебное пособие для студентов вузов/А.С.Ахматов, В.М.Андреевский, А.И.Кулаков и др.; Ред. А.С.Ахматова.-М.: Высш. шк., 1980.-360с.
29. Хижнякова, Л.С. Физика. Механика. Термодинамика и молекулярная физика: учеб. для 7-8 кл. общеобр. учр./Л.С.Хижнякова, А.А.Синявина.-М.: Вита-Пресс, 2000.-256с.
30. Шебалин, О.Д. Молекулярная физика: учебное пособие для студентов матем. фак. пед. ин-тов/О.Д.Шебалин.- М.: Высш. шк., 1978.-167с.