Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» Филиал «Протвино» Кафедра «Математики и естественных наук»

А.А. Масликов

Лабораторные работы по общей физике. «Молекулярная физика и термодинамика»

Электронное методическое пособие

Рекомендовано

кафедрой математики и естественных наук филиала «Протвино» государственного университета «Дубна» в качестве методического пособия для студентов направлений «Автоматизация технологических процессов и производств», «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная информатика», «Физика»

> Протвино 2016

Рецензент: кандидат биологических наук, начальник отдела аналитической химии и радиобиологии НИЦ ТБП – филиала ФГБУ «ГНЦ Институт иммунологии» ФМБА России В.Н. Алдобаев

Масликов, А.А.

М 315 Лабораторные работы по общей физике. «Молекулярная физика и термодинамика»: электронное методическое пособие / А.А. Масликов. — Протвино, 2016. — 59 с.

Данное учебно-методическое пособие рассчитано на студентов изучающих общую физику в рамках комплекса общеобразовательных дисциплин. В течение семестра изучаются важнейшие разделы молекулярная физики и термодинамики. При помощи компьютерных технологий результаты измерений на лабораторных установках непосредственно фиксируются компьютером и отображаются на мониторе. Это позволяет избежать утомительных технических пересчетов измерений результатов в наглядную и удобную для обработки форму, что дает возможность выполнения каждой лабораторной работы во временных рамках двух академических часов. Предназначено для студентов 2-го курса, обучающихся по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств», «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная информатика» и «Физика». Для студентов направления «Физика» представленные в описании работы составляют экспериментальную часть общефизического практикума, дополняющую компьютерный практикум.

ББК 22.3 я 73

© Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2016 © Масликов А.А.

Оглавление.

Введение	4
1. Измерение теплопроводности воздуха	5
2. Исследование изотермического процесса (2 сценария)	.11
3. Исследование изохорного процесса (3 сценария)	19
4. Исследование изобарического процесса (2 сценария)	28
5. Уравнение состояния идеального газа (3 сценария)	38
6. Циклический процесс в газе (4 сценария)	45
7. Зависимость давления насыщенных паров от температуры (1 сценарий)	52
8. Фазовые переходы. Испарение и кипение. (2 сценария)	56
Литература	59

Введение.

Молекулярная физика это раздел физики изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений. Т.е. предполагается, что макроскопические тела состоят из большого числа малых частиц – молекул. Основу молекулярно-кинетической теории заложили исследования газовых законов Шарлем, Гей-Люссаком, Бойлем, Ломоносовым. Газовые законы Марриоттом, описывают процессы, происходящие при постоянном объеме, давлении или температуре газа. Впоследствии эти три закона были естественным образом объединены в уравнение состояния идеального газа Менделеева-Клапейрона. Значительное количество лабораторных работ, описанных в этом пособии посвящено изучению перечисленных газовых законов. Также уделено внимание вопросам термодинамики и теплообмена.

Для обеспечения работы и проведения измерений используется набор цифровых датчиков. Программное обеспечение и компьютерный измерительный блок позволяет регистрировать сигналы, поступающие от датчиков, отображать их на мониторе, записывать в текстовых форматах, проводить обработку данных и представлять ее результаты на экране. Программа допускает остановку записи данных в любой момент времени и оперативный просмотр полученных графиков.

Используемое программное обеспечение позволяет осуществлять экспорт данных в формате электронных таблиц типа Excel или OpenOffice. Использование средств электронных таблиц облегчает создание таблиц, ведение обработки данных, построение параметрических графиков и работу с графиками.

Лабораторная работа 1

Измерение теплопроводности воздуха

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение коэффициента теплопроводности воздуха. ОБОРУДОВАНИЕ:

штатив,	блок питания,
прибор для измерения	стальная пластина,
теплопроводности воздуха,	резистор 22 Ом,
измерительный блок L-микро.	

Явление теплопроводности состоит в возникновении направленного переноса внутренней энергии в газообразных, жидких и твердых телах при наличии в них пространственных неоднородностей температуры. В стационарном одномерном случае явление теплопроводности описывается уравнением Фурье, которое имеет вид:

$$q_e = -k \frac{dT}{dx} \tag{1.1}$$

Здесь q_e - удельный тепловой поток - физическая величина, равная количеству теплоты, переносимой через единичную площадку ΔS , перпендикулярную направлению движения тепла за единицу времени Δt :

$$q_e = \frac{\Delta Q}{\Delta S \cdot \Delta t}; \tag{1.2}$$

k - коэффициент теплопроводности, dT/dx - градиент температуры - изменение температуры вдоль направления потока тепла.

В данной лабораторной работе определение коэффициента теплопроводности воздуха производится методом нагреваемой нити. Измерения проводятся при помощи специального прибора, схема которого показана на рис. 1.1. Прибор представляет собой два коаксиальных цилиндра (1)(2),которые стеклянных И закрыты С торцов теплоизолирующими и электроизолирующими пробками (3) и (4). Через эти пробки во внутренний цилиндр проведена проволочная нить (5), которая нагревается электрическим током. В результате передачи тепла во внешнее пространство температуры цилиндров T_1 и T_2 - разные. При этом имеется в виду внешняя поверхность внутреннего и внутренняя поверхность внешнего цилиндра. Чтобы исключить передачу тепла за счет конвекции цилиндры располагают вертикально, для этой же цели предназначены пробки (3) и (4). дифференциальной Измерение разности температур производится термопарой хромель-копель (7).

Для вывода расчетной формулы используем уравнение Фурье (1.1) и учтем, что передача теплоты происходит не от плоскости к плоскости вдоль

одной пространственной координаты декартовой системы координат, а от одной цилиндрической поверхности к другой, т.е. вдоль радиуса цилиндров.

$$q_e = -k\frac{dT}{dr} \tag{1.3}$$

В приборе, который используется в данной лабораторной работе, перенос теплоты за счет теплопроводности осуществляется между двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами r_1 и r_2 и высотой **h**. Температуры цилиндров в установившемся режиме T_1 и T_2 . Передача теплоты от внутреннего цилиндра к внешнему может происходить за счет трех процессов — теплопроводности, конвекции и лучеиспускания. Уравнение Фурье относится только к процессу теплопроводности, конвекция исключена принятыми мерами вертикальное расположение цилиндров И теплоизолирующие пробки на торцах. Теплоотдачу ИХ 3a счет лучеиспускания учитывать не нужно, т.к. Температура внутреннего цилиндра не превышает 100° С.

Количество теплоты Q, стекшее с цилиндра r_1 в единицу времени и попавшее на цилиндр r_2 , целиком пройдет через любую цилиндрическую поверхность радиуса r. Иными словами, полный тепловой поток <u>не зависит</u> от радиуса цилиндрической поверхности. Его можно определить, как произведение удельного теплового потока при данном значении радиуса r на площадь поверхности соответствующего радиуса $S = 2\pi rh$:

$$Q_r = q_e 2\pi r h \tag{1.4}$$

Умножим левую и правую части уравнения (8.3) на $2\pi rh$:

$$2\pi rhq_e = -2\pi rh \cdot k \frac{dT}{dr}$$

или

$$Q_T = -2\pi r h \cdot k \frac{dT}{dr}$$
(1.5)

Это дифференциальное уравнение можно решить методом разделения переменных. Для этого умножим левую и правую части (1.5) на d*r/r*:

$$Q_T \frac{dr}{r} = -2\pi h k \cdot dT \tag{1.6}$$

В левой части (1.6) — только переменная r, а в правой — только переменная T, поэтому можно проинтегрировать левую и правую части независимо друг от друга. Пределы интегрирования в левой части — r_1 и r_2 , а в правой — T_1 и T_2 :

$$Q_T \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi h k \cdot \int_{T_1}^{T_2} dT$$
(1.7)

Взяв интегралы, получаем:

$$Q_T (\ln r_2 - \ln r_1) = -2\pi h k (T_2 - T_1)$$
(1.8)

Отсюда для Q_T получаем:

$$Q_T = 2\pi h k (T_1 - T_2) \frac{1}{\ln(r_2 / r_1)}$$
(1.9)

Это и есть тепловой поток от первого цилиндра ко второму за счет теплопроводности.

Он должен равняться тепловой мощности, которая выделяется во внутреннем цилиндре за счет нагревания проволочной нити электрическим током $Q = Q_T$ или, подставляя значения входящих сюда величин:

$$I \cdot U = -2\pi h \cdot k \cdot (T_2 - T_1) - \frac{I}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$
(1.10)

Это уравнение полного баланса энергии. Из него найдем коэффициент теплопроводности воздуха:

$$k = \frac{I \cdot U \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi h (T_2 - T_1)}$$
(1.11)

В данной работе используется дифференциальная термопара, которая измеряет разность температур $\Delta T = T_1 - T_2$. Расчетная формула при этом записывается в виде:

$$k = \frac{I \cdot U \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \hbar \Delta T}$$
(1.12)

Значения I и U также как и ΔT измеряются компьютерной измерительной системой, а величины r_1 и r_2 приведены в таблице 1.1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Разместите прибор для измерения коэффициента теплопроводности воздуха на стальной пластине, закрепленной в штативе, так, чтобы стеклянные цилиндры располагались вертикально (рис. 1.2).

2. Подключите измерительный блок L-микро к разъему последовательного порта компьютера и к сети (220 В, 50 Гц) (рис. 1.3).

3. В первый разъем измерительного блока подключите кабель с усилителем (на разъеме этого кабеля имеется метка - буква «У»). Другой

конец этого кабеля подключите к выводам термопарных датчиков (крайние клеммы). При этом термопарные датчики включаются навстречу друг другу, и измеряемое значение температуры соответствует разности температур стенок цилиндров. Если во время измерений получится отрицательное значение разности температур, то следует поменять местами одноштырьковые разъемы, подключенные к установке.

4. Соберите цепь нагревателя (рис. 1.3), подключив его к блоку питания через резистор сопротивлением 22 Ом. Блок питания следует переключить на напряжение 12 В. Для присоединения проводов к выводам нагревателя воспользуйтесь зажимами «крокодил».

5. Подключите ко второму разъему измерительного блока кабель для измерения напряжений на элементах схемы. Одноштырьковые разъемы кабеля подключаются на клеммы резистора *R*.

6. Запустите программу L-физика практикум, выберите пункт меню «выбор работы» и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Измерение теплопроводности воздуха».

7. Нажмите кнопку «проведение измерений» для перехода к измерениям.

8. Нажмите кнопку «пуск» для начала регистрации данных.

9. Включите блок питания в сеть и наблюдайте рост разности температур поверхностей цилиндров на экране компьютера. Значение разности температур можно увидеть в верхнем правом углу экрана. Как только значение ΔT перестанет изменяться (достижение стационарного режима теплопередачи), Вы можете внести разность температур в таблицу.

10. Внесите в таблицу значение напряжения, измеряемое на резисторе *R*.

11. Отключите одноштырьковые разъемы измерительного кабеля от выводов резистора R и подключите их к нагревательному элементу. Измерьте напряжение на нагревателе. Впишите в таблицу полученное значение.

12. Рассчитайте силу тока в цепи нагревателя на основе закона Ома для участка цепи

 $I = U_R / R.$

13. Рассчитайте значение коэффициента теплопроводности воздуха, используя параметры установки и полученные данные.

Расчет коэффициента теплопроводности воздуха *Таблица 1.1*

r ₁ , M	r ₂ , M	h , м	R , Ом	ΔT , град	U_R ,B	U , B	<i>I</i> ,A	<i>k</i> ,
								Вт/(м ·град)
0.002	0.006							

Обозначения, принятые в таблице:

 r_1 - радиус внутреннего цилиндра;

 r_2 - радиус внешнего цилиндра;

h - длина цилиндров;

R - сопротивление резистора, включенного в цепь нагревателя для измерения тока;

 ΔT - стационарное значение разности температур;

 U_R - падение напряжения на резисторе R;

U - напряжение на нагревателе;

I - сила тока в цепи нагревателя;

k - коэффициент теплопроводности.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Осторожно обращаться с прибором, изготовленным на основе стеклянных трубок.

Контрольные вопросы.

- 1. Что такое температура? В каких единицах она измеряется?
- 2. Что такое теплота? В каких единицах она измеряется?
- 3. Что такое теплоёмкость? В каких единицах она измеряется?
- 4. Что такое теплопроводность? В каких единицах она измеряется?
- 5. Объясните физическую сущность законов Фурье.





Рис. 1.2 Вид установки

Рис 1.1 Схема установки



Рис. 1.3 Схема подключения установки

Лабораторная работа 2

Исследование изотермического процесса

Цель работы:

- изучение условий протекания изотермического процесса;

- создание лабораторной установки для изучения изотермического процесса;

- проведение измерений посредством цифровых датчиков;

- обработка данных и построение графиков с результатами измерений, формирование выводов по результатам проведения работы.

Используемое оборудование:

компьютер с установленным программным обеспечением, цифровой датчик абсолютного давления, узел изотермической установки, соединительная трубка из специальной резины длиной ~5 см, штатив с муфтой.

Узел изотермической установки состоит из баллона, датчика объема, втулки-держателя, регулирующего измерительный объём, винта с рукояткой и поршнем, поперечного стержня для возможного закрепления узла в штативе. Узел предоставляется в собранном виде. При хранении узел разбирать не допускается.

Краткая теория.

Процесс, протекающий в газе, при изменении объёма и давления и неизменном значении температуры, называется изотермическим.

Для идеального газа действует соотношение

pV = const, где

р – значение абсолютного давления;

V – объём газа.

График уравнения изотермического процесса называется изотермой. Изотерма, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси абсцисс которой отложен объём газа, а по оси ординат – значение абсолютного давления газа в измерительном объёме, является гиперболой.

Методика проведения опыта.

1. Закрепите узел изотермической установки в муфте штатива, закрепите муфту штатива на удобной высоте.

Примечание.

Допускается проведение опыта без штатива. При этом следует обратить внимание, что при проведении опыта руками можно держаться только за втулку держателя или за поперечный стержень, чтобы рука не влияла на температуру баллона и температуру газа в баллоне.

- 2. Подключите цифровые датчики к входам компьютера. Для подключения можно использовать хаб.
- 3. Нажмите на кнопку с названием «Датчик абсолютного давления».
- 4. Нажмите на кнопку с названием «Датчик объема». Вращая винт, установите регулировочный винт краем поршня на отметку 80 мл (см. рисунок 1).



Рис.2.1

- 5. Плотно и до упора наденьте соединительную трубку на штуцер баллона и на штуцер датчика давления. Фотография установки в сборе приведена на Фото 2.1.
- 6. Нажмите на кнопку «Проведение измерений» и перейдите на страницу проведения измерений.
- На странице проведения измерений нажмите на кнопку «Масштаб» и установите горизонтальный управляющий полозок на отметку 10, повторно нажмите на кнопку «Масштаб» и уберите указатель масштаба с экрана.



Фото 2.1

8. Таблица для данных имеет следующий вид.

Таблица 2.1.

Номер	V(мл)	р _а (кПа)	$b_i = p V$	Δb_i	δb_i
отсчета					
1					
2					

- 9. В процессе проведения опыта будем с помощью сдвига поршня менять измерительный объём и фиксировать соответствующее ему значение абсолютного давления. В установившемся режиме температура газа в баллоне равна комнатной температуре, поэтому отсчет следует производить через несколько секунд после сжатия для выравнивания температуры. Примерный вид получаемого текущего графика представлен на рисунке 2.2.
- 10. Измерительный комплекс из датчиков, компьютера и программы представляет собой регистратор, в том числе длительных процессов, поэтому до окончания опыта нажимать кнопку «Стоп» и останавливать измерения не следует. Все полученные данные можно будет просмотреть после окончания опыта.
- 11. В процессе проведения измерений допускается смотреть на экран и, по окончании переходного процесса изменения давления после каждого изменения объёма производить отсчет и записывать в таблицу значение объёма и значение давления. Рекомендуется производить отсчеты через 10--20 секунд после изменения объёма (см. рис. 2.2). За это время в баллоне после установления нового значения давления восстановится тепловое равновесие. Возможен вариант получения записи полученных данных по окончанию опыта, используя кнопку «Обзор» и маркер для получения отсчетов.





Сценарий 1 (Сжатие).

- 12. Нажмите кнопку «Старт» и запустите регистрацию измеряемого процесса. Зарегистрируйте не менее 10 секунд графика без учета времени установления объема.
- 13. Вращая регулировочный винт, уменьшите измерительный объём на 10 мл. Подождите 10--20 секунд, пока не установится тепловое равновесие в баллоне.
- 14. Повторите п.15, пошагово уменьшая объем по 10 мл до показаний датчика объема 40мл.

Сценарий 2 (Расширение).

- 15. Повторите п. 15, пошагово увеличивая объем до показаний датчика объема 80 мл.
- 16. Нажмите кнопку «Стоп». При необходимости, можно просмотреть все зарегистрированные данные, нажав кнопку «Обзор» (см. рис 2.3).
- 17. Вызовите маркер и считайте показания объема и давления в выбранных точках.
- 18. Вычислите и занесите в таблицу значения произведения значений давления на объем в зарегистрированных точках. Обозначим полученные значения произведений b_i.



Рис. 2.3

- 19. Вычислите среднее значение $b_{cp}=\Sigma b_i/n$, где Σb_i сумма значений параметра b_i , а n число отсчетов.
- 20. Вычислите отклонения значений b_i от b_{cp} и занесите $\Delta b_{i max}$ в таблицу.
- 21. Вычислите и занесите таблицу оценку относительной погрешности измерений

 $\delta b_i = (\Delta b_{i \text{ max}} / b_{cp}) \ 100\%$.

22. Проанализируйте результаты опыта.

Если отклонения произведений $b_i = p_i V_i$ от b_{cp} малы, можно считать, что соотношение pV = const выполняется с погрешностью оцениваемой значением δb .

23. Для иллюстрации полученных результатов, постройте график изотермы, отложив по оси ординат значения р и по оси абсцисс значения V и график с полученными данными, отложив по оси абсцисс значения произведений р V, а по оси ординат – номера отсчетов с результатами.

Приложение.

Пример данных, полученных в опыте, и представление обработки данных с помощью электронных таблиц приведен на рисунке 2.4.

	1 2	3				ИЗОТ	EPMA.xlsm	- Micros	oft Excel							×
Фай	л Гла	вная М	еню В	ставка Разм	иетка страницы	Формулы Д	ца <u>нн</u> ые Рец	цензирова	ние В	ид Разр	аботчик	Office Tab				- 🗗 XX
l F	🛓 🄏 ິ	Calibri	<u>,</u>	r 11 r A*	. 📮 🗕 🔊		Общий	r -	👪 Усло	вное форма	тирование т	встан	вить т Σ	• A	.40.	
	💷 📭 -								🏢 Форм	атировать к	ак таблицу т	🛛 🎬 Удалі	ить т 🖪	- N u		
Вста	вить 🍼	ж к	Ч - 🗄] • 🧐 • 🗛			≝ - % 000	,00 , 00	📑 Стил	и ячеек т		📳 Форм	иат т 🧳	сортиров	ка Наитии • выделить	
Буфер	обмена Г	ĸ	Шриф	т	Б Выравнива	ние Б	Число	- Fai		Стили		Ячей	ки	Редактир	ование	
	M22	•	· (=	f_{x}												^
																-
2	изотерми	4.xlsm * ×														
	A	В	С	D	E	F		G	Н	1	J	К	L	M	N	0
23 T	аблица 1	. Экспери	ментальн	ые данные												
24						3011.0000/0										
25	1	<u>V(МЛ)</u>	P(KIIa)	P*V	49.C	0PV=100%*	ару/руср			320	исимои	сть по	олоци	а от об	10442	
26	2	70	11/1 50	0001,6	48,6	0,6	0		Р	Jab	NCNIVIO	пь да	БЛСНИ	я 01 00	DCIVIA	
27	3	60	133 38	80021,5	-10.2	-0.1	13		250							
29	4	50	160,72	8036	23	0,2	9		200							
30	5	40	199,17	7966,8	-46,2	-0,5	58		200							
31	6	50	159,87	7993,5	-19,5	-0,1	24		150 -							
32	7	60	132,86	7971,6	-41,4	-0,5	52									
33	8	70	114,32	8002,4	-10,6	-0,1	13		100 -							
34	9	80	100,77	8061,6	48,6	0,6	51		50							
35									30							
35				D) (cp=001.2					0 -)	v — 🗌
39				Pvtp=6013					0	2	0	40	60	80	100	
39																
40			_													
41	∂PV		Относ	ительна	я погрешн	ость, %						P*V				
42	0,80								9000							
43	0,60	、							8000 -							
44	0.40	\mathbf{i}							7000 -							
45	0,40			^					6000 +							_
46	0,20			\wedge					5000 +							
47	0,00		\searrow				N		4000 -							
48	-0,20 -	1 2	3	4 5	6 7	8 9			3000 -							
49	-0.40			$ \rightarrow $	\wedge /				2000 -							
51	0.60								1000 -							
52	-0,00								0 +						<u>ا س</u>	1 - 1
53	-0,80									1 2	3	4 5	0	/ 0	9	
54																
55																
56	NSN H		* 1						1	4						▼ ►
Гото	80 2									•				100% 🗩		+

Рис. 2.4

Лабораторная работа 3

Исследование изохорного процесса

Цель работы:

- изучение условий протекания изохорного процесса;

- создание лабораторной установки для изучения изохорного процесса;

- проведение измерений посредством цифровых датчиков;

- обработка данных и построение графиков с результатами измерений, формирование выводов по результатам проведения работы.

Используемое оборудование:

компьютер с установленным программным обеспечением, цифровой датчик абсолютного давления, стеклянная банка с герметичной крышкой и штуцером, со встроенным цифровым датчиком температуры, соединительная трубка из специальной резины, штатив с муфтой и поперечным стержнем, шприц без иглы (50 мл), химический стакан (2000 мл), горячая вода (~1200 мл, ~80°C).

Краткая теория.

Изохорным процессом называется процесс, протекающий при неизменном объеме.

Для идеального газа уравнение изохорного процесса имеет вид

$$p/T = const,$$

где р – абсолютное давление, Т – абсолютная температура.

В нашем опыте давление измеряется в kPa, а температура в °C. Для перевода в абсолютную температуру в °K используется соотношение

 $t(^{o}C) = 0^{o}C = T(^{o}K) = 273,15^{o}K.$

График уравнения изохорного процесса называется изохорой. Изохора, изображенная в прямоугольной системе координат, с отсчетом по осям абсолютного давления и температуры является прямой, проходящей через начало координат.

Соотношение между абсолютным давлением и абсолютной температурой можно выразить с помощью формулы

 $p = p_0 \, \acute{lpha} \, T$, где

 p_0 – давление газа при температуре 0°С,

ά – параметр, называемый температурным коэффициентом давления, теоретически = 1/(273,15°K) для идеального газа.

Методика проведения опыта.

Подготовка к проведению опыта.

1. Соберите лабораторную установку для исследования изохорного процесса:

- плотно и до упора наденьте соединительную трубку на штуцер банки и штуцер датчика давления;

- используя крепежное отверстие и крепежный винт датчика давления, закрепите собранный узел установки, состоящий из стеклянной банки, соединительной трубки и датчика абсолютного давления на поперечном стержне штатива;

- направьте поперечный стержень штатива в противоположную от основания штатива сторону.

2. Закрепите собранную установку для исследования изохорного процесса в штативе (см. фото 3.1).



Фото 3.1.

3. Подключите цифровые датчики температуры и абсолютного давления к компьютеру (для подключения рекомендуется использовать USB-хаб).

4. Нажмите на кнопки с названием датчиков (рис. 3.1), затем нажмите на кнопку «Проведение измерений» и перейдите на страницу проведения измерений.



Рис. 3.1

5. На странице проведения измерений нажмите кнопку «Масштаб» и установите горизонтальный управляющий полозок на отметку 20 секунд в клетке (рис. 3.2), повторно нажмите на кнопку «Масштаб» и уберите указатель масштаба с экрана.



Рис. 3.2

- 6. Наберите горячую воду (температура ~80°С) в химический стакан большого объема.
- 7. При проведении измерений необходимо, чтобы температура газа была одинаковой и установившейся по всему объему резервуара с газом. Кроме того, следует учитывать, что датчик температуры на воздухе обладает значительной тепловой инерцией (постоянная времени *т* установления температуры на воздухе ~15 секунд). Показания датчика давления, по сравнению с показаниями датчика температуры, устанавливаются практически мгновенно. Следовательно, изменение температуры в опыте должно производиться медленно. Обратите внимание, что утечка воздуха из установки должна быть практически равной нулю за время установления температуры.
- 8. Нагрев исследуемого газа проводится с помощью горячей воды, в которую помещается резервуар с газом. Регистрация результатов для замедления теплообмена производится при остывании резервуара на воздухе. Не рекомендуется производить остывание измерительного объема с использованием холодной воды.

Датчик давления негерметичен. Категорически не допускается попадание воды в штуцер датчика и в корпус датчика.

Проведение опыта.

- 1. Нажмите экранную кнопку «Старт» и запустите регистрацию данных с датчиков на компьютере.
- 2. Измерительный комплекс из датчиков, компьютера и программы представляет собой регистратор, в том числе длительных процессов, поэтому до окончания опыта нажимать кнопку «Стоп» и останавливать измерения не следует.
- 3. По окончании опыта можно будет, при необходимости, заново просмотреть весь график с данными и считать соответствующие показания давления для заполнения таблицы.
- 4. Погрузите резервуар с воздухом в горячую воду (крышка должна быть погружена в воду) и подождите некоторое время для полного прогрева газа в резервуаре.

5. Извлеките резервуар из сосуда с горячей водой и оставьте остывать на воздухе. Измерения можно остановить, когда температура воздуха снизится до значений, близких к комнатным. После остановки регистрации нажмите экранную кнопку «Обзор». Рекомендуется сохранить полученный файл в выбранной вами директории и с выбранным вами названием (см. рис 3.3).



Рис. 3.3

6. Данные можно занести в таблицу следующего вида.

Таблица 3.1.

N⁰	p _a	t (°C)	T (°K)	p/T	$\Delta(p/T)=$	δ(p/T)=100%*
отсчета	(kPa)				$=(p/T)_{i}-(p/T)_{cp.}$	$\Delta(p/T)/(p/T)_{cp.}$

Пример таблицы в программе Excel приведен на рисунке 3.5.

7. Вызовите маркер на экран, выделив требуемый вам фрагмент записи с охлаждением газа, произведите замеры давления и температуры и

заполните таблицу 3.1. Для выравнивания температуры по внутреннему объему газа первый отсчет берите не на максимуме графиков, а со сдвигом на 30--40 секунд (см. рис. 3.4)



Рис. 3.4

- 8. Пересчитайте измеренную температуру, выраженную в ^оС, в абсолютную температуру, выраженную в ^оК.
- 9. Графики изохоры рекомендуется строить в следующих осях:

- по оси абсцисс следует отобразить разметку абсолютной температуры в диапазоне от 0°К до ~360°К;

 по оси ординат следует отобразить разметку абсолютного давления в диапазоне от 0 kPa до ~130 kPa;

- нарисуйте дополнительную ось ординат (с разметкой по абсолютному давлению), проходящую через ~273°К (0°С).

10. Нанесите на график точки с экспериментальными данными со значениями температуры и давления (см. рис. 3.5). Обратите внимание,

что, при правильно проведенном опыте, полученные экспериментальные точки с высокой степенью достоверности укладываются на прямую линию.

Сценарий 1.

11. Вычислите значения (p/T) для каждого отсчета и среднее значение отношений (p/T)_{ср.} Вычислите разброс данных относительно среднего значения Δ(p/T)=(p/T)_i--(p/T)_{ср.}и относительное значение отклонения δ(P/T)=100%*Δ(p/T)/ (p/T)_{ср}. Полученные данные показывают, что с вычисленной статистической погрешностью выполняется соотношение, характеризующее изохорный процесс

p/T = const.

Сценарий 2.

12. По полученному соотношению p/T = const можно построить график изохоры. Найдите в таблице значение р в строке с минимальным отклонением от среднего значения р/Т. Эта точка практически, с указанным допуском, лежит на требуемом графике. Используя полученное в опыте значение const и значение р в выбранной строке, вычислите значение T = p/const, соответствующее экспериментальному графику изохоры. Вычтите экспериментальное значение t в шкале соответствующее выбранному значению Цельсия, ри получите экспериментальное значение температуры В шкале Кельвина соответствующее нулю градусов в шкале Цельсия и, тем самым, полученное в опыте значение абсолютного нуля.

Посчитайте значение $\alpha = 1/T_{3\kappa c \pi}$ и сравните с теоретическим значением.

Сценарий 3.

13. Теоретически соотношение между абсолютным давлением и абсолютной температурой можно выразить с помощью формулы

 $p = p_0 \alpha T$, где $p_0 - давление$ газа при температуре 0°С,

 $\dot{\alpha}$ – параметр, называемый температурным коэффициентом давления, теоретически равен 1/(273,15°K) для идеального газа. С помощью линейной регрессии в электронных таблицах по полученным данным можно построить зависимость p(T) методом наименьших квадратов, откуда получить значение p₀ при температуре t=0°C, а также получить

значение для абсолютного нуля, при котором p=0 и T=0 для идеального газа.

Но при обработке полученных данных следует учитывать некоторые особенности. Используемое оборудование и датчики имеют свои погрешности систематические и случайные, воздух при давлении близком к нормальному, не является идеальным газом и т.д. Измерительный интервал температур, используемый в опыте мал по сравнению с экстраполируемым интервалом температур до точки абсолютного нуля. Даже **небольшие ошибки** в экспериментальных данных, особенно систематические, при использовании линейной регрессии с представлением по формуле Y = a X+b на **большом интервале экстраполяции** приведет к **большим отклонениям** в определении точки абсолютного нуля при р=0.

Поэтому, если вы считаете, что получения результата подтверждающего соотношение $\mathbf{p/T} = \mathbf{const}$ при изохорическом процессе недостаточно, то линейную регрессию для обработки данных следует использовать с представлением результата по формуле Y = aX, без свободного члена b, который априори приравнивается к 0. В наших обозначениях Y = aX, соответствует P = a T.

Примечание.

Выбирая метод обработки, следует учитывать не только точность метода, но и устойчивость результата. Метод наименьших квадратов по п.13 является более точным (метод, а не результат), но в данном случае менее устойчивым. Неустойчивость результата связана с большим интервалом интерполяции и связанным с ним большим отклонением в определении Т при небольших отклонениях в определении экспериментальных значений р/Т.

C		17 - (1	1 × <u>14</u> ×	Ŧ		И	Ізохора_Ех	cel_График.	xls [Реж	им сови	естим	ости] - М	licrosoft Exce	I неком	мерчес	кое испо.	1ьзован	ние					-	σx
	0	тавная	Встави	a Pasi	метка стран	ицы Фо	рмулы	Данные	Рецензи	рование	Ви	A											<u> </u>	ΞX
			Стр	аничный р	режим 🛛	Линейка	0	/ Строка фо	рмул	9	1		Q	램	овое окн	10	Pa:	зделить				- 23		3
06	ячный	Разметк		2дставлени	IR 🗹	Сетка		Заголовки		Ласштаб	100%	Macun	габировать		порядоч	ить все	CK	рыть	at .	Coxpa	нить	Перейти	в Мак	росы
	P	страниці Іскимы п		весь экран а книги		Панель сос	общении	CEDNITS				выделени Аасштаб	ный фрагмент	<u>د س</u>	акрепить	области		образить	1021	рабочую	область /	другое ок	10 * Mar	*
	N	123	- (6	fx			coline co			_	in custo						U.U.	10)(×
4	A	2.5	в	c	D	E	F	G	н		1	J	K	L	M	N	0	Р	Q	R	S	т	U	v =
1			-	-	-	изохор	A							-			-				-			The second se
2					-		1.010.001																	
4	N	1	113,27	66,24	339,39	0,33374584	-0,0025488	-0,0857159																
5		2	112,35	63,24	336,39	0,33398734	-0,0023073	-0,0775944																
7		4	111,59	59,44	334,84	0,33326365	-0,003031	-0,1019316																
8		5	110,2	57,04	330,19	0,33374724	-0,0025474	-0,0856688																
9		7	109,57	54,95	328,1 326.19	0,33395306	-0,0023416	-0,078747																
11		8	108,48	50,89	324,04	0,33477348	-0,0015212	-0,0511566																
12		9	107,66	47,83	320,98	0,33541031	-0,0008844	-0,0297407																
14		11	106,28	42,9	316,05	0,33627591	-1,876E-05	-0,000631																
15		12	105,66	40,61	313,76	0,33675421	0,00045954	0,01545399																
17		14	104,72	37,11	310,26	0,33752337	0,0012287	0,04132044																
18		15	104,34	35,72	308,87	0,33781202	0,00151735	0,05102782																
20		17	103,06	31,05	306,23	0,33830781	0,0024956	0,08392568																
21		18	102,57	29,4	302,55	0,33901834	0,00272367	0,09159571																
22		20	102,19	28,05	301,2	0,33927623	0,00298156	0,10026822								1								
24		21	101,6	26,11	299,26	0,33950411	0,00320944	0,10793176																=
25				1	Среднее	0,33629467																		
27				Зависим	юсть Р от	гT						Провер	ка Р/Т=сог	nst										
28	114								0,4															_
30																								
31																								
33	110					_/			0,3															
34									0.25															
36	108				_/			_																
37									0,2															
39	506			/																				
40	-		/	/																				
42									0,5															
43	502	_/																						
45									0,05															
46	100								•															
48									•		•	2	1		20									_
49																								
50	N N	0	0	/8	/00/							_					_							×
For	BO	JINCTI	_лист2	/ листз	<u></u>																100 759			- (P
-	-			A 1 H			Т	-			a													
2	тусі	5	<u> </u>	V RU	— С 🗖 И	soxopa		💾 2015 ноя	орь дено	H	💌 Mer	osoft Excel	неко											15:56

Рис. 3.5

Лабораторная работа 4

Исследование изобарического процесса

Цель работы:

- изучение протекания изобарического процесса;

- создание лабораторной установки для изучения изобарического процесса;

- проведение измерений посредством цифровых датчиков;

- обработка данных и построение графиков с результатами измерений, формирование выводов по результатам проведения работы.

Используемое оборудование:

компьютер с установленным программным обеспечением, цифровой датчик абсолютного давления, датчик объема газа со встроенным датчиком температуры, соединительная трубка из специальной резины, штатив с муфтой, сосуд с горячей водой (~60°С).

В основе датчика объема газа с контролем температуры лежит герметичный резервуар из пластика с гофрированной боковой поверхностью.

Все элементы датчика размещены на контейнере. Конструкция обеспечивает перемещение подвижного основания резервуара вдоль продольной оси. Это основание жестко связано подвижной частью датчика. Перемещение подвижной части, а следовательно, и изменение объема преобразуется в электрический сигнал.

Гофрированный резервуар легко деформируется вдоль продольной оси при разности давлений не более 1--2 kPa (~2% от давления исследуемого газа). Применяемый резервуар допускает нагрев не более, чем до 60--70°С в сосуде с горячей водой.

Датчик температуры находится внутри резервуара в центральной его части. Датчик температуры обладает определенной температурной инерцией (постоянная времени на воздухе τ ~15 секунд). Для установления примерно однородного распределения температуры внутри резервуара требуется время. Запаздывание показаний датчика температуры от показаний датчика объема приводит к появлению дополнительной погрешности эксперимента.

Датчик давления негерметичен. Категорически не допускается попадание воды в штуцер датчика и в корпус датчика.

Краткая теория.

Процесс, протекающий в газе, при изменении объёма и температуры и при неизменном давлении, называется изобарическим.

Для идеального газа, при неизменной массе газа и молекулярном весе газа, действует соотношение V/T=const и $V=V_0 \dot{\alpha}T$, где V- текущее значение объема газа, V_0 – объем, занимаемый газом при температуре 0°C, $\dot{\alpha}$ – называемый коэффициентом объемного расширения равен 1/273,15 K⁻¹.

Обратите внимание, что воздух не является идеальным газом. Свойства воздуха становятся близкими к свойствам идеального газа только при сильном расширении. Следует отметить, что при температурах близких к абсолютному нулю действуют другие газовые законы (например, уравнение Ван-дер-Ваальса).

При проведении измерений необходимо, чтобы температура газа была одинаковой и установившейся по всему объему резервуара с газом. В реальном опыте распределение температуры по резервуару неоднородно. Кроме того, следует учитывать, что датчик температуры на воздухе обладает

значительной тепловой инерцией (постоянная времени *т* установления температуры на воздухе ~15 секунд). Показания датчика объема, по сравнению с показаниями датчика температуры, устанавливаются практически мгновенно.

Экспериментальное исследование зависимости объема газа от температуры провел в 1802 году французский физик Ж. Гей-Люссак.

Методика проведения опыта.

Подготовка к проведению опыта.

- 1. Закрепите датчик объема газа с контролем температуры и датчик давления на штативе. Наденьте вакуумный шланг на свободный штуцер датчика объема. Плотнее наденьте пробку поршня на горловину гофрированного резервуара.
- 2. Подключите датчики к компьютеру. Для подключения рекомендуется использовать хаб. В программе перейдите на страницу подготовки к измерениям.
- 3. Выберите датчик объема с контролем температуры. Слегка надавливая на подвижное основание резервуара вдоль продольной оси, установите объем резервуара близкий к минимальному (400--450 мл) (см. рис.4.1). Придерживая резервуар в сжатом состоянии, наденьте вакуумный шланг на штуцер датчика абсолютного давления.



Рис.4.1

- 4. Убедитесь в герметичном подсоединении пробки в горловине резервуара. Для этого слегка растяните резервуар и через некоторое время отпустите его. Резервуар должен вернуться в исходное сжатое состояние.
- 5. Собранная установка представлена на фото 4.1.



Фото 4.1.

- 6. Выберите датчик абсолютного давления и перейдите на страницу проведения измерений.
- 7. Нажмите экранную кнопку «Масштаб» и установите горизонтальный управляющий полозок в положение 50, вертикальный управляющий полозок установите в положение максимум, используя возможность

прокрутки экрана, нажмите на левую кнопку мыши, не отпуская её, потяните изображение вниз (см. рис. 4.2). Повторно нажмите кнопку «Масштаб» и уберите указатели масштаба с экрана.





- 8. Нажмите экранную кнопку «Старт» и начните регистрацию данных.
- Измерительный комплекс из датчиков, компьютера и программы представляет собой регистратор, в том числе длительных процессов, поэтому до окончания опыта нажимать кнопку «Стоп» и останавливать измерения не следует.
- 10. Аккуратно подставьте сосуд с горячей водой (~60°С) под установку, закрепленную в штативе, и погрузите резервуар с воздухом в горячую воду. Резервуар должен быть полностью погружен в горячую воду. Подождите некоторое время для полного прогрева газа в резервуаре. Убедитесь, что при изменении температуры и объема, значение давления практически не меняется.

Примечание.

Не идеальность гофрированного резервуара, используемого в опыте, приводит к незначительному дрейфу давления и, соответственно появлению некоторой дополнительной погрешности. В момент

погружения произойдет скачёк давления ~2 kPa, связанный С переносом из воздушной среды в более плотную водяную И размера не только вертикальной оси. В ходе изменением ПО дальнейшего проведения давление практически опыта стабилизируется.

- 11. Извлеките резервуар из сосуда с горячей водой. Наблюдайте изменения температуры и объема воздуха в резервуаре при охлаждении. Обратите внимание, что давление практически не меняется.
- 12. При снижении температуры до значений близких к комнатным, нажмите кнопку «Стоп» и остановите регистрацию данных. Нажмите кнопку «Обзор». Пример полученного графика приведен на рис. 4.3.



Рис. 4.3

13. По окончании опыта можно будет, при необходимости, заново просмотреть весь график с данными с помощью кнопки «Обзор» и считать соответствующие показания объема и температуры для заполнения таблицы. Рекомендуется сохранить файл с записью полученного графика в выбранную вами папку с выбранным вами именем.

- 14. Рекомендуется использовать для получения данных графики при остывании резервуара на воздухе. При нагреве на данные повлияют механические помехи – неравномерность движения при погружении, этап частичного погружения, возможное задевание гофрированными стенками резервуар стенок сосуда с водой и т. д.
- 15. Таблица должна содержать 15--20 строк.

N⁰	$V(cm^3)$	t(°C)	T(^o K)	V/T	$\Delta(V/T)=$	δ(V/T)=100%*
					$=(V/T)_{I} - (V/T)_{cp.}$	$\Delta(V/T)/(V/T)_{cp.}$

16. Нажмите кнопку «Обзор» (см. рис. 4.4). При желании выделите более крупно фрагмент записи с процессом остывания. Используя маркер, проведите измерения значений объема и температуры и занесите данные в таблицу. Рекомендуется примерно равномерно распределить точки измерений по интервалу времени охлаждения примерно через 50 сек. Измерение первой пары точек следует произвести через ~3 минуты после начала процесса охлаждения (см. рис. 4.4).



Рис. 4.4

- 17. Обработку данных рекомендуется проводить в Excel. Пример обработки данных и построения графика приведен на рисунке 4.5.
- 18. Пересчитайте измеренную температуру, выраженную в ^оС, в абсолютную температуру, выраженную в ^оК.
- 19. Графики изохоры рекомендуется строить в следующих осях:

- по оси абсцисс следует отобразить разметку абсолютной температуры в диапазоне от 0°К до ~360°К;

по оси ординат следует отобразить разметку объема в диапазоне от 0 мл до ~ 550 мл;

- нарисуйте дополнительную ось ординат с разметкой по объему, проходящую через ~273°К (0°С).

20. Постройте график с экспериментальными данными температуры и объема (см. рис. 5). Обратите внимание, что, при правильно проведенном опыте, полученные экспериментальные точки с высокой степенью достоверности укладываются на прямую линию.

Сценарий 1.

21. Вычислите значения (V/T) для каждого отсчета и среднее значение отношений (V/T)_{ср.} Вычислите разброс данных относительно среднего значения Δ(V/T)=(V/T)_i--(V/T)_{ср.}и относительное значение отклонения δ(V/T)=100%*Δ(V/T)/ (V/T)_{ср}. Полученные данные показывают, что с некоторой погрешностью выполняется соотношение, характеризующее изобарный процесс

V/T = const.

- 22. Посчитайте значение $\alpha = 1/V_{_{3ксп.}}$ и сравните с теоретическим значением. *Сценарий 2*.
 - 23. Теоретически соотношение между объемом и абсолютной температурой можно выразить с помощью формулы

 $V = V_0 \dot{\alpha} T$, где

 V_0 – объем газа при температуре 0°С,

ά – параметр, называемый температурным коэффициентом объема, теоретически равен 1/(273,15°К) для идеального газа.

С помощью линейной регрессии в электронных таблицах по полученным данным можно построить зависимость V(T) методом наименьших квадратов, получить экстраполированное экспериментальное значение для абсолютного нуля.

Однако, при обработке полученных данных следует учитывать некоторые особенности. Используемое оборудование и датчики имеют свои погрешности систематические и случайные, воздух при давлении близком к нормальному, не является идеальным газом и т.д. Измерительный интервал температур, используемый в опыте мал по сравнению с экстраполируемым интервалом температур до точки абсолютного нуля. Даже **небольшие ошибки** в экспериментальных данных, особенно систематические, при использовании линейной регрессии с представлением по формуле Y = aX+b на большом интервале экстраполяции приведет к большим отклонениям в определении точки абсолютного нуля при V=0.

Поэтому, если вы считаете, что получения результата, подтверждающего соотношение V/T = const при изобарическом процессе недостаточно, то линейную регрессию для обработки данных следует использовать с представлением результата по формуле Y=aX, без свободного члена b, который априори приравнивается к 0. В наших обозначениях Y = aX, соответствует V = a T.

Пример данных, полученных в опыте, и представление обработки данных в электронных таблицах приведены на рисунке 4.5.



Лабораторная работа 5

Уравнение состояния идеального газа

Цель работы:

- создание лабораторной установки для изучения постоянства величины pV/T, соответствующего уравнению состояния идеального газа;

- проведение измерений посредством цифровых датчиков;

- обработка данных и построение графиков с результатами измерений, формирование выводов по результатам проведения работы.

Используемое оборудование:

компьютер с установленным программным обеспечением, цифровой датчик абсолютного давления, цифровой датчик температуры, узел изотермической установки, соединительная трубка из специальной резины длиной ~25 см, сосуд для воды, горячая вода (~50--60°С), холодная вода (~15°С), штатив с муфтой.

Эксперимент по изучению особенностей уравнения состояния идеального газа проводится на базе установки для изучения изотермического процесса.

Узел изотермической установки состоит из баллона, датчика объема, втулки-держателя, регулирующего измерительный объём, винта с рукояткой и поршнем, поперечного стержня для возможного закрепления узла в штативе. Узел предоставляется в собранном виде. Для хранения узел разбирать не допускается.

При отсутствии датчика температуры в опыте можно использовать любой обычный термометр соответствующего диапазона из состава оборудования лаборатории физики.

Краткая теория.

Для идеального газа действует соотношение

(p V)/T = const = n R, где

р – значение абсолютного давления, V – объём газа, Т- температура газа в шкале Кельвина, n – количество молей газа, R = 8,31 Дж/(моль К) – газовая постоянная.

В процессе опыта создадим условия для изменения составляющих p, V или T, вычислим значение выражения (p V)/T для каждого состояния и убедимся, что полученные значения близки между собой, т.е. с некоторой погрешностью, обусловленной не идеальностью аппаратуры (p V)/T = const.

Следует обратить внимание, что воздух при нормальном давлении не является идеальным газом. С некоторым приближением близкими к идеальному газу свойствами обладает сильно разреженный воздух.

Методика проведения опыта.

- 1. Закрепите узел изотермической установки в муфте штатива, закрепите муфту штатива на удобной высоте.
- 2. Подключите цифровые датчики к входам компьютера. Для подключения рекомендуется использовать хаб.
- 3. Нажмите на кнопки с названием «Датчик абсолютного давления» и «Датчик температуры».

4. Нажмите на кнопку с названием «Датчик объема». Вращая винт, установите регулировочный винт краем поршня на отметку 80 мл (см. рисунок 5.1).



Рис.5.1

5. Плотно и до упора наденьте соединительную трубку на штуцер баллона и на штуцер датчика давления. Фотография установки в сборе приведена на Фото 5.1.



Фото 5.1

- 6. Нажмите на кнопку «Проведение измерений» и перейдите на страницу проведения измерений.
- 7. На странице проведения измерений нажмите на кнопку «Масштаб» и установите горизонтальный управляющий полозок на отметку 20 секунд в клетке, повторно нажмите на кнопку «Масштаб» и уберите указатель масштаба с экрана.
- 8. Таблица для данных имеет следующий вид.

Таблица 5.1.

Номер	V	t°C	T⁰K	p _a	b _i =(pV)/T	Δb_i	δb_i
отсчета	(мл)			(кПа)			
1							
2							

- 9. В процессе проведения опыта будем с помощью сдвига поршня менять измерительный объём и фиксировать соответствующее ему значение абсолютного давления при комнатной температуре, погрузив баллон с измерительным объемом воздуха последовательно в горячую воду, затем в холодную воду. Отсчет следует производить через несколько секунд после изменения объема с помощью поршня для установления теплового равновесия.
- 10. Измерительный комплекс из датчиков, компьютера и программы представляет собой регистратор, в том числе длительных процессов, поэтому до окончания опыта нажимать кнопку «Стоп» и останавливать измерения не следует. Все полученные данные можно будет просмотреть после окончания опыта.

Сценарий 1 (изотермический процесс при комнатной температуре).

- 11. Нажмите кнопку «Старт» и запустите регистрацию измеряемого процесса. Зарегистрируйте не менее 10 секунд графика без учета времени установления объема.
- 12. Вращая регулировочный винт, уменьшите измерительный объём до 60 мл. Подождите 10--20 секунд, пока не установится тепловое равновесие в баллоне.
- 13. Увеличьте объем до показаний датчика объема 100 мл и зафиксируйте примерно на 10 секунд.

Сценарий 2 (изотермический процесс при повышенной температуре).

14. Подставьте сосуд с горячей водой и опустите в неё баллон так, чтобы измерительный объем (т. е объем до поршня) полностью погрузился в воду. Выждите до установления теплового равновесия, зафиксируйте параметры состояния, измените объем до 80 мл, а затем 60 мл, фиксируя параметры в каждом состоянии примерно по 20 секунд.

Сценарий 3 (изотермический процесс при пониженной температуре).

15. Приподнимите установку и смените горячую воду в сосуде на холодную.

- 16. Опустите баллон с измерительным объемом в холодную воду и выждите некоторое время до установления теплового равновесия, зафиксируйте параметры состояния, затем последовательно, фиксируя в каждом состоянии не менее 10 секунд, увеличьте объем сначала до 80 мл, затем до 100 мл.
- 17. Верните установку в исходное состояние, вынув из воды и установив объем 80 мл.
- 18. Нажмите кнопку «Стоп». При необходимости, можно просмотреть все зарегистрированные данные, нажав кнопку «Обзор» (см. рис 2).
- 19. Вызовите маркер и считайте показания в выбранных точках. Ориентируйтесь при выборе участка, соответствующего определенному состоянию, в первую очередь на показания датчика объема, затем на показания датчика давления.



Рис. 5.2

20. При проведении работы по изучению изотермического процесса использовалась соединительная трубка длиной 5 см, в данной работе используется трубка длиной 25 см. При некотором увеличении

допустимой экспериментатором погрешности дополнительным объемом можно по-прежнему пренебрегать. При желании уменьшить общую погрешность эксперимента следует вычислить дополнительный объем по геометрическим размерам трубки и суммировать с объемом баллона установки. В этом случае в таблицу вводиться дополнительная колонка и расчет ведется по скорректированным значениям объема.

- 21. Вычислите и занесите в таблицу значения выражения (pV)/Т в выбранных точках. Обозначим полученные значения b_i.
- 22.Вычислите среднее значение $b_{cp}=\Sigma b_i/n$, где Σb_i сумма значений параметра b_i , а n число отсчетов.
- 23. Вычислите отклонения значений b_i от b_{cp} и занесите $\Delta b_{i max}$ в таблицу.
- 24. Вычислите и занесите таблицу оценку относительной погрешности измерений

 $\delta b_i = (\Delta b_{i \max} / b_{cp}) \ 100\%.$

25. Проанализируйте результаты опыта.

Если отклонения произведений $b_i = p_i V_i$ от b_{cp} малы, можно считать, что соотношение pV = const выполняется с погрешностью оцениваемой значением δb .

Пример данных, полученных в опыте, и представление обработки данных в электронных таблицах приведены на рисунке 5.3.

91	Главная	(°4 × № *) ∓ Вставка	Разметка стра	ницы Форм	График.xls лулы Данны	5 [Режим совм не Рецензир	естимости] - N ование Вид	licrosoft Excel i	екоммерческое і	использо	вание				
Par	X	Arial	• 11 • A			Общий	·				В™ Вставить * В¥ Удалить *	Σ -	A 18		
btie	- V	жкч				A 3 %	000 360 400	форматировани	е т как таблицу т	ячеек т	Формат *	Q* 40	фильтр т выделить	-	
јуфер	обмена 🖻	Ш	рифт	🕞 Выр	равнивание	G Чи	сло 🕞		Стили		Ячейки	Pe	дактирование		
	L6	• (0	Jx	-	-	-					. Строк	а формул			-
4	A	В	С	D	E	F	G	Н	- I	J	Keipok	a dobility.	M	N	0
1		Ура	внение	состоян	ния иде	ального	газа								
2															
3	N	D(kDa)	\/(ml)	+(C)	T(K)	D\//T	٨b	ab							
-	1	102 78	80.04	21.67	294.82	27 9035045	0 39299021	1 42850914							
5	2	131,92	60,09	21,77	294,92	26,8787224	-0,6317919	-2,2965472					1		
	3	84,43	100,09	21,91	295,06	28,6402721	1,12975785	4,10664023							
_	4	90,99	100,08	56,45	329,6	27,6282743	0,11775997	0,42805442							
0	5	112,42	80,11	55,92	329,07	26 4065862	-0,1425798	-0,5182739							
1	7	129.16	60.06	16.59	289.74	26,7734852	-0.7370291	-2.6790815							
2	8	99,38	80,01	16,38	289,53	27,4631085	-0,0474058	-0,1723189							
3	9	82,55	100,04	16,04	289,19	28,5566652	1,04615087	3,80273105							
1	10	99,21	80,03	15,71	288,86	27,4865897	-0,0239246	-0,0869653							
5 6					Среднее	27,5105143									
7															
3				Проверн	ka PV/T=c	onst									
	35														
-															
t	30														
		\sim	\sim												
-	25														
-															
-	20														
	15														
)															
>	10														
	5														
+															
ł	0						40								
t	0	2		•	6	8	10	12							
4.)	₩ Лист:	1 / Лист2 / Лі	ист3 / 🖓 🦯									Ш			•
JOB	0								_	_		_		J% (=)	
4	IVCK	i 😂 🔞 📀	i 👘 🗁 i	Уравнение состо	яни 🔟 20)15 ноябрь Дено Н	I 🔯 Micro	soft Excel неко							0 16:2

Рис. 5.3

Лабораторная работа 6

Циклический процесс в газе

Цель работы:

- создание лабораторной установки для изучения циклического процесса в газе;

- проведение измерений посредством цифровых датчиков;

- обработка данных и построение графиков с результатами измерений, формирование выводов по результатам проведения работы.

Используемое оборудование:

компьютер с установленным программным обеспечением, цифровой датчик абсолютного давления, узел изотермической установки, соединительная

трубка из специальной резины длиной 25--30 см, сосуд для воды, горячая вода (~50--60°С), штатив с муфтой.

Эксперимент по изучению циклического процесса в газе проводится на базе установки для изучения изотермического процесса.

Узел изотермической установки состоит из баллона, датчика объема, втулки-держателя, регулирующего измерительный объём, винта с рукояткой и поршнем, поперечного стержня для возможного закрепления узла в штативе. Узел предоставляется в собранном виде. При хранении узел разбирать не допускается.

Краткая теория.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ цикл циклический процесс, осуществляемый термодинамической системой. Изучаемые в термодинамике представляют собой сочетания циклы различных термодинамических процессов, изотермических, адиабатических, И В первую очередь изобарических, изохорических.

На рисунке 6.1 представлены графики в координатах давления и объема, соответствующие некоторым видам циклических процессов.



Рис.6.1

График 6.1а соответствует циклу Карно, график 6.16 – циклу Клапейрона, график 6.1в – циклу Клаузиуса-Ранкина.

В настоящей работе рассмотрим один из видов циклических процессов в газе, который принято называть циклом Клапейрона.

Цикл Клапейрона образуется двумя изотермами, полученными при разных температурах и увеличении или уменьшении объема, и двумя изохорами,

соответствующими участкам с изменением температуры при неизменном объеме.

В процессе опыта создадим условия для изменения V в трех состояниях при двух разных значениях температуры.

Для строго построения гиперболы, соответствующей изотерме, требуется не менее 5 точек. В работе ставится задача показать общий принцип формирования циклического процесса, что не требует точных вычислений и, для упрощения демонстрации ограничимся тремя точками на каждой изотерме.

Методика проведения опыта.

- 1. Закрепите узел изотермической установки в муфте штатива, закрепите муфту штатива на удобной высоте.
- 2. Подключите цифровые датчики к входам компьютера. Для подключения рекомендуется использовать хаб.
- 3. Нажмите на кнопки с названием «Датчик абсолютного давления».
- 4. Нажмите на кнопку с названием «Датчик объема». Вращая винт, установите регулировочный винт краем поршня на отметку 80 мл (см. рисунок 6.1).



Рис.6.1

5. Плотно и до упора наденьте соединительную трубку на штуцер баллона и на штуцер датчика давления. Фотография установки в сборе приведена на Фото 6.1.



Фото 6.1

- 6. Нажмите на кнопку «Проведение измерений» и перейдите на страницу проведения измерений.
- 7. На странице проведения измерений нажмите на кнопку «Масштаб» и установите горизонтальный управляющий полозок на отметку 20 секунд в клетке, повторно нажмите на кнопку «Масштаб» и уберите указатель масштаба с экрана.
- 8. Таблица для данных имеет следующий вид.

Таблица 6.1.

Номер отсчета	V (мл)	Р _а (кПа)
1		
2		
8		

- 9. В процессе проведения опыта будем с помощью сдвига поршня менять измерительный объём и фиксировать соответствующее ему значение абсолютного давления при комнатной температуре и погрузив баллон с измерительным объемом воздуха в горячую воду. Отсчет следует производить через несколько секунд после изменения объема для установления теплового равновесия. Проводя часть опыта, соответствующего условию низкой температуры на воздухе, несколько увеличивает время ожидания установления термодинамического равновесия, но упрощает опыт.
- 10. Измерительный комплекс из датчиков, компьютера и программы представляет собой регистратор, в том числе длительных процессов, поэтому до окончания опыта нажимать кнопку «Стоп» и останавливать измерения не следует. Все полученные данные можно будет просмотреть после окончания опыта.
- 11. Нажмите кнопку «Старт» и запустите регистрацию измеряемого процесса. Зарегистрируйте не менее 10 секунд графика без учета времени установления объема.

Сценарий 1 (изохорический процесс).

- 12. Вращая регулировочный винт, уменьшите измерительный объём до 60 мл. Подождите 10...20 секунд, пока не установится тепловое равновесие в баллоне. Условно будем считать эту точку началом цикла.
- 13. Не меняя объема, подставьте приготовленный сосуд с горячей водой и опустите в него баллон так, чтобы измерительный объем (т. е объем до поршня) полностью погрузился в воду. Выждите до установления теплового равновесия.

Сценарий 2 (изотермический процесс при повышенной температуре).

14. Зафиксируйте давление при измерительном объеме 60 мл, увеличьте объем до 80 мл, а затем 100 мл, фиксируя параметры в каждом состоянии примерно по 20 секунд.

Сценарий 3 (изохорический процесс).

15. Выньте баллон из горячей воды и выждите некоторое время до установления теплового равновесия.

Сценарий 4 (изотермический процесс при нормальной температуре).

- 16. Зафиксируйте давление при объеме 100 мл, затем последовательно, фиксируя в каждом состоянии не менее 10 секунд, уменьшите объем сначала до 80 мл, затем до 60 мл.
- 17. Нажмите кнопку «Стоп». При необходимости, можно просмотреть все зарегистрированные данные, нажав кнопку «Обзор» (см. рис 6.2).
- 18. Верните установку в исходное состояние, установив объем 80 мл, так как легче снять соединительную трубку при атмосферном давлении внутри баллона.
- 19. Вызовите маркер считайте выбранных И показания В точках. Ориентируйтесь соответствующего выборе при участка, определенному состоянию, показания датчика объема, на но учитывайте время необходимое на установление термодинамического равновесия.



Рис. 6.2

- 20. При проведении работы по изучению изотермического процесса использовалась соединительная трубка длиной 5 см, в данной работе используется трубка длиной 25--30 см. Для показа общего принципа циклического процесса некоторым увеличением допустимой экспериментатором погрешности можно пренебречь.
- 21. По результатам опыта легко построить в электронных таблицах график процессов протекающих в цикле Клапейрона в осях абсолютного давления по вертикали и объема по горизонтали.

Пример данных, полученных в опыте, и представление обработки данных в электронных таблицах приведены на рисунке 6.3.



Рис. 6.3

Лабораторная работа 7

Зависимость давления насыщенных паров от температуры

Цель работы:

- изучение зависимости давления насыщенных паров при изменении температуры.

Используемое оборудование:

компьютер с установленным программным обеспечением, цифровой датчик абсолютного давления, стеклянная банка с герметичной крышкой и штуцером, со встроенным цифровым датчиком температуры, соединительная трубка из специальной резины, штатив с муфтой и поперечным стержнем, насос Комовского, зажим для трубок, тройник, шланг вакуумный, сосуд с водой, переходник.

Краткая теория.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным. Динамичность равновесия означает, что число молекул, покидающих жидкость в единицу времени равно числу молекул, возвращающихся В жидкость. Давление, при котором наблюдается равновесие, называется давлением насыщенного пара. Естественно оно зависит от вида жидкости и температуры. Установка для демонстрации зависимости давления насыщенных паров от температуры состоит из резервуара постоянного объема, из которого в ходе эксперимента с помощью вакуумного насоса откачивается воздух. В качестве объекта исследования используется раствор этилового спирта.

Методика проведения опыта.

Подготовка к проведению опыта.

1. Соберите лабораторную установку для исследования изохорного процесса:

- плотно и до упора наденьте соединительную трубку на штуцер банки и штуцер датчика давления;

- используя крепежное отверстие и крепежный винт датчика давления, закрепите собранный узел установки, состоящий из стеклянной банки,

соединительной трубки и датчика абсолютного давления на поперечном стержне штатива;

- направьте поперечный стержень штатива в противоположную от основания штатива сторону.
- 3. Закрепите собранную установку для исследования изохорного процесса в штативе (см. фото 7.1).



Фото 7.1.

- 4. Подключите к ней при помощи переходника насос Комовского.
- 5. Подключите цифровые датчики температуры и абсолютного давления к компьютеру (для подключения рекомендуется использовать USB-хаб).
- 6. Нажмите на кнопки с названием датчиков (рис. 7.1), затем нажмите на кнопку «Проведение измерений» и перейдите на страницу проведения измерений.

Цисорован паторатория Проведение измерений Поделонізнике дотчног : Азтник температуры -5+105/С	Подготовка датчика абсолютного давления 200кПа к работе	
Датик арсолютного давления 200/Ла	 При проведении абсолютных измерений нажните кнопку «проведение измерений реал подготовки. Пи измерения произраний давления : • отсоедниите датчик от пневнатического измерительного • отсоедниите датчик от пневнатического измерительного • подключите датчик и кимерительной установке и нажните кнопку «Проведение кимерений» 	
Gregario (paño)	www.uchtehpribor.ru) • • • •



- 7. На странице проведения измерений нажмите кнопку «Масштаб» и установите горизонтальный управляющий полозок на отметку 20 секунд в клетке (рис. 7.2), повторно нажмите на кнопку «Масштаб» и уберите указатель масштаба с экрана.
- 8. Подогрейте воду до температуры 60°С. Нагрев резервуара со спиртом в жидком и газообразном состояниях осуществляется путем погружения его в предварительно нагретую воду.



Рис. 7.2

Предварительные измерения.

- 10. Нажмите экранную кнопку «Старт» и запустите регистрацию данных с датчиков на компьютере. Измеряемые давление и температура представляются в виде зависимостей от времени и составляют порядка 100 кПа и 20°С соответственно.
- 11. Измерительный комплекс из датчиков, компьютера и программы представляет собой регистратор, в том числе длительных процессов, поэтому до окончания опыта нажимать кнопку «Стоп» и останавливать измерения не следует.
- 12. Снимите зажим, отделяющий насос от объема установки и начните откачку. Датчик давления будет показывать снижение давления воздуха в объеме установки. Предельный уровень давления (1 кПа или менее). С помощью зажима отсоедините насос от системы и убедитесь в ее герметичности (показание датчика давления не должны изменяться в течение минуты).
- 13. Отверните крышку резервуара, налейте в него несколько миллилитров этилового спирта и плотно закройте крышку.
- 14. Снова откачайте установку с помощью насоса Комовского. Продемонстрируйте учащимся то, что предельное давление, до которого удалось откачать систему, составляет около 10 кПа, что соответствует давлению насыщенных паров спирта при комнатной температуре.
- 15. С помощью зажима отсоедините насос от газовой схемы и прекратите откачку.
- 16. Погрузите стеклянный резервуар вместе с крышкой в горячую воду и дождитесь изотермического равновесия системы, на что может уйти несколько минут.

Проведение опыта.

- 17. Извлеките резервуар из сосуда с нагретой водой.
- 18. Нажмите экранную кнопку «Старт» и запустите регистрацию данных с датчиков на компьютере. Пар в резервуаре начнет остывать и конденсироваться на стенках, при этом будет меняться значения давления и температуры, регистрируемые датчиками.

- 19. Завершите регистрацию через 10-15 минут, когда температура внутри резервуара практически сравняется с комнатной, нажав кнопку "Стоп".
- 20. Выберите из графика 15-20 точек и заполните таблицу. p₀ минимальное зарегистрированное в эксперименте давление пара.
- 21. Проанализируйте результаты и сделайте выводы.

Таблица 7.1

N⁰	р, кПа	$Lg(p/p_0)$	t(°C)	T (K)

Лабораторная работа 8

Фазовые переходы. Испарение и кипение.

Цель работы:

- изучить основные закономерности процесса испарения.

Используемое оборудование:

Термопарные цифровые датчики температуры (до 120 С) – 2 шт.; компьютерный измерительный блок; рабочее поле; магнитная плата с зажимами – 2 шт.; демонстрационный штатив; пробирка; фильтрованная бумага, вата; вода, спиртовой раствор.

Краткая теория.

Испарение — эндотермический процесс, при котором поглощается теплота фазового перехода — теплота испарения, затрачиваемая на преодоление сил молекулярного сцепления в жидкой фазе и на работу расширения при превращении жидкости в пар. Удельную теплоту испарения относят к 1 молю жидкости (молярная теплота испарения, Дж/моль) или к единице её массы (массовая теплота испарения, Дж/кг). Количество теплоты, которое необходимо сообщить единице массы вещества для того, чтобы превратить ее в пар, находящийся при той же температуре, какую имело вещество до испарения, называется удельной теплотой испарения (или сублимации, если речь идет о твердом веществе). Отметим, что при испарении покидают жидкость наиболее энергичные молекулы, что дополнительно приводит к остыванию жидкости. Сравним испарение воды и этилового спирта. Известно, что спирт гораздо более летучая жидкость, чем вода. Это может показаться странным, поскольку молярная масса спирта 46 (г.), а у воды всего 18 (г.) Однако молекула воды ведёт себя как диполь, что приводит к дополнительным межмолекулярным связям, резко уменьшающим летучесть воды. В самом деле, удельная теплота испарения воды при комнатной температуре составляет $k_{\rm H2O}(20C)=2453$ кДж/кг, а для спирта этот коэффициент гораздо меньше $k_{\rm C2H5OH}(20C)=910$ кДж/кг. В данном опыте предлагается это пронаблюдать, отслеживая сравнительную интенсивность остывания двух жидкостей.

Методика проведения опыта.

В настоящем эксперименте изучается процесс испарения на примере нескольких жидкостей с использованием двух температурных датчиков для сравнения. Испарение жидкости осуществляется при комнатной температуре с ватных тампонов, зафиксированных на датчиках температуры. Показания датчиков отображаются на мониторе компьютера в реальном времени в виде графиков, а также записываются в файл выбранного формата.

Подготовка к проведению опыта.

Цифровые датчики температуры до 120 С подключают к 1-му и 2-му разъему измерительного блока. Датчики фиксируются на рабочем поле с помощью магнитных плат с зажимами в вертикальном положении. На ПК запускается пакет LPhysics, выбирается раздел «Молекулярная физика» \rightarrow «Тепловые явления» \rightarrow «Изучение фазовых переходов» \rightarrow «Испарение вещества». Раздел «Настройка оборудования» позволяет выставить значение комнатной температуры (по умолчанию за нее принимается значение, выдаваемое датчиком с 1-го канала). В разделе «Проведение измерений», нажав кнопку ПУСК можно начать измерения, которые будут отображаться на мониторе ПК в виде графиков.

Проведение опытов.

Сценарий 1.

Предполагается путем сравнения испарения пары жидких веществ сделать вывод о соотношении их коэффициентов удельной теплоты испарения. Два ватных тампона смачиваются разными жидкостями (спиртовым раствором и водой) и помещаются на датчики температуры, предварительно запустив процесс измерения в пакете LPhysics. На экране отчетливо видно, что наблюдается падение температур. Причем охлаждение происходит гораздо интенсивнее со спиртовым раствором, чем с водой. Наблюдается обратная пропорциональность между углом наклона графика, померенным OT отрицательного направления оси времени (абсцисс) и удельной теплотой испарения. Чем меньше удельная теплота испарения, тем интенсивнее испаряется жидкость, что приводит к более быстрому ее охлаждению. У этилового спирта почти в 3 раза ниже удельная теплота испарения, что дает значительно больший эффект остывания в случае спирта. Студентам предлагается сохранить результаты измерений цифровых датчиков в текстовом формате, а затем перенести данные в электронные таблицы. Далее там воспроизвести графики по точкам, проанализировать графики и сделать выводы.

Сценарий 2.

Предлагается исследовать зависимость удельной теплоты испарения жидкости от концентрации ее паров в окружающем пространстве (которую можно описывать парциальным давлением паров). Чем больше концентрация пара, тем более затруднено испарение, т.е. эффективно повышается удельная теплота испарения. Этот факт можно продемонстрировать, накрыв влажный тампон пробиркой. Тогда концентрация паров под пробиркой возрастёт и испарение замедлится. Индикатором этого будет служить факт повышения (после предварительного понижения), температуры который можно наблюдать в реальном времени на экране монитора. Основываясь на этом явлении можно, вообще говоря, измерять влажность окружающего воздуха. Идея заключается в сравнении температуры «сухого» и «влажного» термометров. Разумеется, такой прибор (гигрометр) нужно предварительно откалибровать.

Литература.

- Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / И.В. Савельев; под общ. ред. В.И. Савельева. – М.: КНОРУС, 2009. – 528 с.: ил.
- Кузнецов С. И. Физика: Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие [Электронный ресурс] / С.И. Кузнецов. - 4-е изд., испр. и доп. - М.: Вузовский учебник: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 248 с. ISBN 978-5-9558-0317-3 // ЭБС "Znanium.com". - URL: http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=412940. Режим доступа: ограниченный по логину и паролю.
- 3. Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика. Ч. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс]: В 2 ч.: учебник / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 303 с.: ил. - ISBN 978-985-06-2505-2. // ЭБС "Znanium.com". - URL: http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=509708. Режим доступа: ограниченный по логину и паролю.
- Прошкин, С. С. Механика, термодинамика и молекулярная физика. Сборник задач: учебное пособие для академического бакалавриата / С. С. Прошкин, В. А. Самолетов, Н. В. Нименский. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 467 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-04772-1. // ЭБС "Юрайт". - URL: https://biblio-online.ru/book/B682794E-AA1E-4D42-A70F-5978B4D9101F. Режим доступа: ограниченный по логину и паролю.
- Савельев, И.В. Курс общей физики: В 4 т. Т. 4. Сборник вопросов и задач по общей физике: учебное пособие / И.В. Савельев; под общ. ред. В.И. Савельева. – М.: КНОРУС, 2009. – 384 с.: ил.