

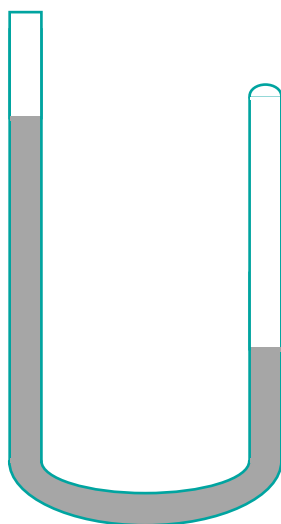
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Г Рипп, Е.В. Мирошниченко, В.А. Лисютин

ЗАКОН БОЙЛЯ – МАРИОТТА

Учебное пособие
по общей физике для студентов технических
и естественно-научных специальностей



Севастополь
СевГУ
2026

УДК 533.1(075.8)
ББК 22.365я73
Р537

Рецензент:
С.А.Чернявская – канд. физ.-мат. наук, доцент

Рипп А.Г.

Р537 Закон Бойля – Мариотта: учебное пособие по общей физике для студентов технических и естественно-научных специальностей / А.Г. Рипп, Е.В. Мирошниченко, В.А. Лисютин; Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2026. – 13 с.: ил. – Текст : электронный.

Учебное пособие разработано преподавателями кафедры «Физика» СевГУ и предназначено для студентов 1 и 2 курсов технических и естественно-научных специальностей, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам: «физика» и «физический практикум». В пособии студентам предлагается познакомиться с тем, как с помощью прибора Бойля можно экспериментальным путём проверить закон Бойля – Мариотта и измерить массу порции воздуха, с которой проводится эксперимент. Лабораторная установка, на которой предлагается провести эксперименты, виртуальная.

Пособие содержит краткий теоретический материал, описание лабораторной установки, порядок выполнения лабораторной работы и методы оценки погрешности измерений. Материал изложен подробно и в доступной форме. Для студентов, желающих получить больше информации, в конце пособия приводится список литературы.

УДК 533.1(075.8)
ББК 22.365я73

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Физика», протокол № 2 от 28 октября 2025 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

Работа 72 А. Закон Бойля – Мариотта

Цель работы

Экспериментальная проверка закона Бойля – Мариотта с помощью прибора Бойля. Измерение массы газа в приборе Бойля.

1. Краткая теория

Закон Бойля – Мариотта вам знаком ещё из курса физики средней школы. Он описывает изотермический процесс. Суть закона в том, что при изотермическом сжатии идеального газа его давление p нарастает обратно пропорционально объёму V , так что произведение pV остаётся неизменным:

$$pV = \text{const.} \quad (1)$$

Этот закон является следствием уравнения Менделеева – Клапейрона

$$pV = \nu RT, \quad (2)$$

где ν – количество молей газа, T – абсолютная температура газа, R – универсальная газовая постоянная. Если количество газа в ходе процесса неизменно, то правая часть уравнения (2) – константа, что и доказывает закон Бойля – Мариотта. Однако открывателям этого закона уравнение Менделеева – Клапейрона было неизвестно, и свой закон они сформулировали на основании экспериментальных исследований. Это было сделано в 17 веке. Сначала закон открыл английский учёный Роберт Бойль со своим помощником Ричардом Таунлеем. Результаты проделанных исследований они опубликовали в 1662 году. Через 14 лет этот же закон независимо от Р. Бойля обнаружил французский учёный Эдм Мариотт.

Исследования Р. Бойля и Р. Таунлея были проведены более точно и более подробно. Устройство, которое они использовали, сейчас называется прибором Бойля. Он показан на рисунке 1. Это по сути – разновидность ртутного барометра, то есть изогнутая U-образная стеклянная трубка, в которую налита ртуть. Один конец трубки запаян (на рисунке 1 это – правое колено), и в нём над ртутью находится некоторая порция воздуха, которая и представляет собой объект исследования¹. Второй конец трубки (левый) открыт в атмосферу. При добавлении ртути в открытое колено воздух в закрытом колене сжимается, и его давление нарастает. Зная площадь поперечного сечения трубки

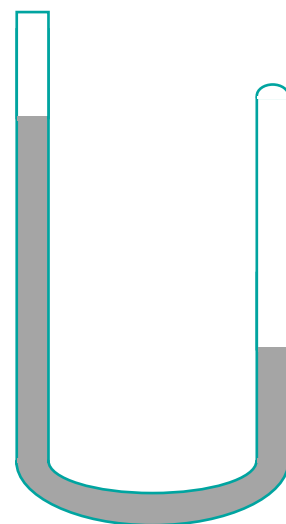


Рис. 1. Прибор Бойля

¹ В ртутном барометре запаянное колено не содержит воздуха – там вакуум.

и измерив высоту части трубки, занятой воздухом, можно измерить объём воздуха V . А измерив разность уровней ртути в коленях и зная атмосферное давление, можно измерить давление воздуха p . Осталось только убедиться в том, что при добавлении ртути произведение pV не изменяется. Кстати, первым обратил на это внимание Р. Таунлей – помощник Р. Бойля.

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка – виртуальная, то есть представляет собой компьютерную программу, имитирующую реальную установку. Программа разработана в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

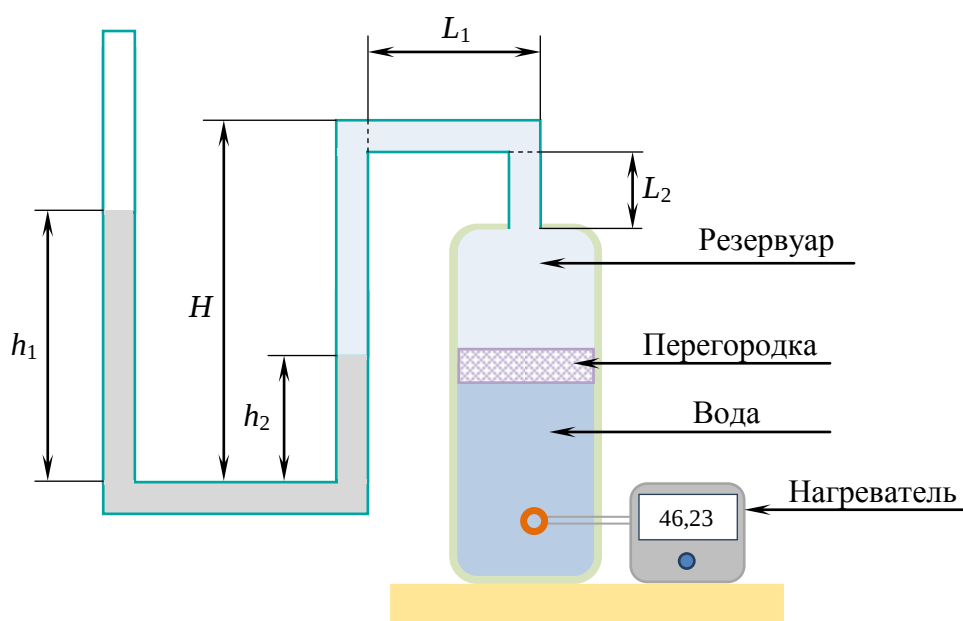


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Установка представляет собой модифицированный прибор Бойля, она показана на следующем рисунке 2.

Отличия экспериментальной установки от прибора Бойля, показанного на рисунке 1, следующие.

1. Вместо ртути используется глицерин, причём его можно не только доливать в открытое колено, но и удалять (желаемыми порциями). В реальности удалить порцию жидкости из трубки технически очень сложно, поэтому Р. Бойль и Р. Таунлей удаляли ртуть только на этапе подготовки эксперимента, а в ходе эксперимента они лишь малыми порциями доливали ртуть.

2. Рабочее вещество в установке (в закрытом колене) – не воздух, а газ, который можно выбирать из предлагаемого списка. В 17 веке вообще не было ещё понятия «газ», никто не знал, что воздух – не однородная среда, а смесь газов.

3. Для того чтобы можно было изменять температуру газа, в установку введён теплоизолированный сосуд (калориметр), в состав которого входят следующие объекты.

- Вода (в нижней части калориметра). Её можно нагревать с помощью нагревательного элемента, который получает энергию от нагревателя. Нагреватель снабжён ручкой для регулировки температуры и цифровым термометром.
- Резервуар. Это верхняя часть калориметра, соединённая с закрытым коленом трубки. Поэтому в состав рабочего вещества входит газ, находящийся в трубке и в резервуаре.
- Сменная перегородка между водой и резервуаром. Одна перегородка не проводит тепло, вторая (медная) – теплопроводящая. Если установлена медная перегородка, то газ в резервуаре находится в тепловом контакте с водой и в равновесном состоянии (после окончания теплообмена с водой) его температура равна температуре воды.

При вызове программы открывается окно ***Законы идеального газа***. В центральной части окна приведены цель работы и краткое описание работы. Внизу окна – три управляющие кнопки:

- **Ход работы.** При нажатии этой кнопки открывается окно, в котором показан порядок выполнения работы. Эту кнопку нажимать не надо, так как предлагаемый вам порядок выполнения работы отличается от того, который заложен разработчиками программы.
- **Эксперимент.** При нажатии на эту кнопку открывается окно с экспериментальной установкой – рабочий экран.
- **Завершение работы.** Эта кнопка вызывает выход из программы.

Рабочий экран установки показан на рисунке 3. Он содержит четыре панели инструментов и окно визуализации.

В окне визуализации показана установка и вертикальная линейка, позволяющая измерять уровни глицерина в открытом и закрытом коленях.

Назначение и возможности, которые предоставляют панели инструментов, следующие.

Газ.

Панель предназначена для выбора одного из 12 газов. После выбора газа на панели появляется информация о молярной массе газа μ .

Жидкость в трубке (глицерин).

Главное назначение панели – добавлять или убавлять количество глицерина в трубке. Для этого предусмотрены две кнопки: **Увеличить** и **Уменьшить** и окошко, позволяющее выбрать объём одной порции глицерина в миллилитрах.

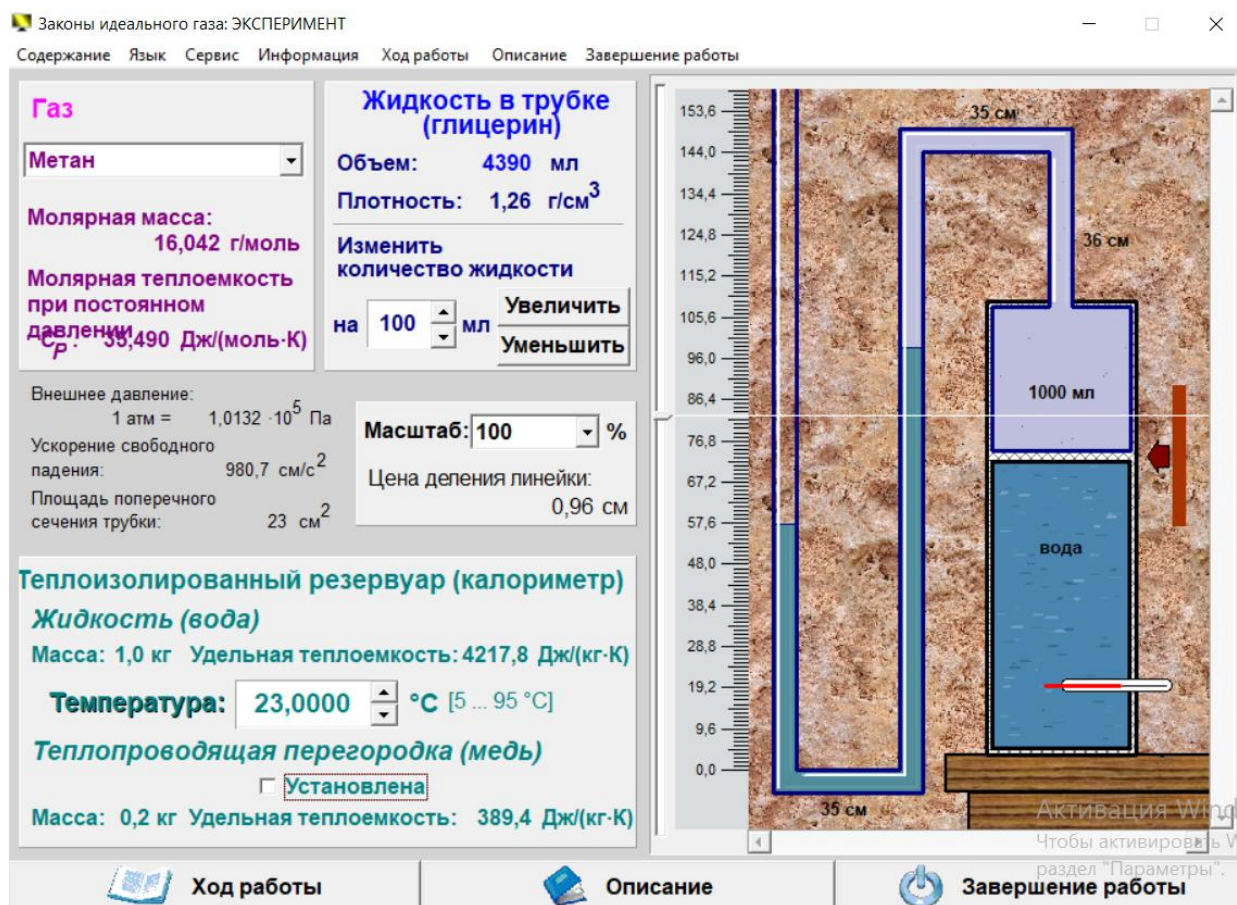


Рис. 3. Рабочий экран лабораторной установки (Окно **Эксперимент**)

Масштаб.

Эта панель предназначена для наблюдения установки в окне визуализации с разной степенью увеличения. Предусмотрены 9 значений масштаба от 100% до 500%. При увеличении масштаба уменьшается цена деления линейки в окне визуализации и точность измерения высот глицерина в коленях трубки.

Теплоизолированный резервуар (калориметр).

Панель позволяет изменять температуру воды и устанавливать нужную перегородку между водой и газом: теплопроводящую (медную) или непроводящую. Если установлен флажок **Установлена**, то перегородка медная, если флажок не установлен, то перегородка непроводящая. Кроме того, на панель выдаётся информация о массе и удельной теплоёмкости воды и перегородки.

3. Методика измерения объёма, давления газа и массы газа

Измерение объёма.

Газ занимает следующие три области.

- Основная трубка.

Это вертикальная трубка, в нижней части которой – глицерин. В соответствии с рисунком 2, высота трубки равна H , высота глицерина в ней – h_2 , поэтому объём газа в трубке равен

$$V_T = S(H - h_2), \quad (3)$$

где S – площадь сечения трубки.

- Две соединительные трубки.

Их длины равны L_1 и L_2 , а объём газа в них равен

$$V_1 = S(L_1 + L_2).$$

- Резервуар.

Объём резервуара V_p показан в миллилитрах в области визуализации.

В ходе эксперимента при изменении количества глицерина в трубке объёмы V_1 и V_p составляют *неизменяемую* часть объёма газа V_0 :

$$V_0 = V_1 + V_p = S(L_1 + L_2) + V_p = \text{const.} \quad (4)$$

Объём всего газа равен

$$V = V_T + V_0. \quad (5)$$

Измерение давления.

В соответствии с законом Паскаля, давление газа равно давлению в открытом колене на высоте h_1 . Это давление складывается из давления столба глицерина p_T и атмосферного давления p_0 :

$$p = p_T + p_0, \quad p_T = \rho g(h_1 - h_2), \quad (6)$$

где ρ – плотность глицерина.

Измерение массы.

Масса газа в лабораторной установке – величина постоянная, это – не функция состояния. Её можно измерить, получив экспериментальную зависимость давления газа от объёма $p(V)$ и используя уравнения Менделеева – Клапейрона (2):

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

из которого следует, что

$$m = \frac{\mu}{RT} pV. \quad (7)$$

Достаточно одного опыта, то есть однократного измерения объёма и давления газа, чтобы по формуле (7) определить массу газа². Однако, проделав серию опытов и получив экспериментальную зависимость $p(V)$, можно решить две задачи: во-первых, убедиться в том, что в изотермическом процессе $pV = \text{const}$ (в справедливости закона Бойля – Мариотта), а во-вторых, определить произведение pV в каждом из опытов, а затем найти среднее значение $\langle pV \rangle$ и, используя его, определить по формуле (7) массу газа. В этом случае точность измерения массы значительно выше, чем при использовании результатов одного опыта.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Выберите по согласованию с преподавателем газ, с которым вы будете проводить эксперимент, и температуру газа. Внесите эту информацию в таблицу 1 и в соответствующие окошки рабочего экрана. При установке температуры надо действовать так.

- Поставьте *непроводящую* перегородку, для этого уберите флажок **Установлена**.
- Выберите стрелками нужную температуру. При этом вы должны понимать, что термометр показывает температуру *воды*, а не газа.
- Замените перегородку на *теплопроводящую*, для чего установите флажок **Установлена**. После этого начнётся теплообмен между водой и газом, их температуры будут изменяться.
- Дождитесь, когда температура перестанет изменяться, это будет означать, что система вода–воздух пришла в равновесное состояние, релаксация закончилась, температура воды и воздуха *одна и та же*. Однако теперь эта температура не та, которую вам надо установить. Поэтому надо снова поставить непроводящую перегородку и повторить всю процедуру снова. Повторяйте её до тех пор, пока термометр в конце релаксации не станет показывать ту температуру, которую вы согласовали с преподавателем.

4.2. Заполните остальные ячейки таблицы 1. Для увеличения точности эксперимента рекомендуется использовать достаточно точные значения констант. В частности, ускорение свободного падения приведено на рабочем экране с точностью до 4 значащих цифр³, а значение универсальной газовой постоянной можно узнать (например, в интернете) ещё точнее – правда, достаточно 5 – 6 значащих цифр.

² Разумеется, надо ещё знать, какой конкретно газ используется в установке, то есть его молярную массу μ , и температуру газа.

³ В интернете можно узнать значение g в Севастополе с гораздо большей точностью, однако это значение вряд ли можно считать достоверным.

Таблица 1

Условия эксперимента

Газ			
Молярная масса газа			
Температура газа	T	К	
Жидкость в трубке			
Плотность жидкости в трубке	ρ	г/см ³	
Внешнее (атмосферное) давление	p_0	Па	
Площадь поперечного сечения трубки	S	см ²	
Объём резервуар	V_p	мл	
Длина основной трубки	H	см	
Длина первой соединительной трубки	L_1	см	
Длина второй соединительной трубки	L_2	см	
Неизменяемая часть объёма газа	V_0	мл	
Ускорение свободного падения	g	м/с ²	
Универсальная газовая постоянная	R	Дж/(моль·К)	
Погрешности прямых измерений, неизменяемых величин и заданных величин	$\Delta(h)$	см	
	$\Delta(S)$	см ²	
	$\Delta(L)$	см	
	$\Delta(T)$	К	
	$\Delta(V_p)$	мл	
	$\Delta(V_0)$	мл	
	$\Delta(p_0)$	Па	
	$\Delta(\rho)$	г/см ³	

4.3. Установите масштаб 100%, а затем уменьшите количество жидкости в трубке – так, чтобы высота жидкости в открытом колене h_1 была 10 – 20 см.

4.4. Увеличьте масштаб до 500% и измерьте, пользуясь вертикальной линейкой и её бегунком, высоту уровней жидкости в открытом и закрытом коленях h_1 и h_2 . Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 2

Зависимость давления газа p от его объёма V при постоянной температуре

Номер опыта	h_1 см	h_2 см	V_T мл	V л	p_T Па	p кПа	pV Дж	$\Delta(V_T)$ мл	$\Delta(V)$ л	$\Delta(p_T)$ Па	$\Delta(p)$ кПа
1											
2											
...											
...											

4.5. Снова установите масштаб 100%, а затем увеличьте количество жидкости и проделайте пункт 4.4.

- 4.6.** Повторите пункт 4.5 ещё несколько раз – так, чтобы у вас получилось не менее 10 опытов. Порция добавляемой жидкости каждый раз может быть разная, но лучше, чтобы эти порции не сильно отличались друг от друга и чтобы в последнем опыте высота уровня жидкости в открытом колене h_1 была не менее 120 см.
- 4.7.** Заполните остальные столбцы таблицы 2. Обратите внимание на единицы измерения и не ошибитесь при их переводе.
- 4.8.** Прокомментируйте данные в таблице 2.
- 4.9.** На основании данных таблицы 2 постройте график экспериментальной зависимости давления газа p от его объёма V . Вставьте планки погрешностей и линию тренда.
- 4.10.** Прокомментируйте построенный график.
- 4.11.** Если ваши эксперименты подтвердили, что во всех опытах произведение pV – это практически неизменная величина, то проделайте статистическую полученного массива значений pV и используйте полученные результаты для измерения массы газа. Для этого воспользуйтесь функциями СРЗНАЧ, СТАНДОТКЛОН, ДОВЕРИТ.СТЮДЕНТ и заполните таблицу 3.

Таблица 3

Статистическая обработка массива значений pV
и измерение массы газа m

Величина	pV	m
Размерность	Дж	г
Среднее значение		
Среднеквадратичное отклонение		
Доверительная вероятность		
Абсолютная случайная погрешность		
Относительная случайная погрешность		

- 4.12.** Прокомментируйте таблицу 3 – обратите внимание на величину среднеквадратичного отклонения $\sigma(pV)$.
- 4.13.** Оцените приборную погрешность измерения массы газа. Для это заполните таблицу 4.

Таблица 4

Оценка приборной погрешности измерения массы газа m

$\varepsilon(\mu)$	$\varepsilon(T)$	$\varepsilon(p)$	$\varepsilon(V)$	$\varepsilon_{\text{пр}}(m)$	$\Delta_{\text{пр}}(m)$
%	%	%	%	%	г

- 4.14.** Прокомментируйте таблицу 4 и запишите результат измерения массы газа в стандартном виде.
- 4.15.** Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

5. Оценка погрешностей измерений

5.1. Погрешности прямых измерений.

Прямым способом измеряются высота уровней жидкости в коленях h_1 , h_2 и температура T . Их погрешности оцените самостоятельно.

5.2. Погрешности заданных величин.

Как правило, погрешностью заданной величины считают единицу в младшем разряде. В данной лабораторной работе есть два исключения. Во-первых, длины соединительных трубок L_1 и L_2 приведены с точностью до единиц сантиметров, однако погрешность $\Delta(L)$ на два порядка меньше, то есть не 1 см, а 0,1 мм. То же самое относится к площади поперечного сечения трубок S : она задана в см^2 в виде целого числа, однако погрешность $\Delta(S)$ равна не 1 см^2 , а на два порядка меньше, то есть $0,01 \text{ см}^2$.

5.3. Погрешность измерения объёма газа в основной трубке V_T .

Величина V_T определяется по формуле (3):

$$V_T = S(H - h_2),$$

из которой следует, что

$$\Delta(V_T) = (H - h_2)\Delta(S) + 2S\Delta(h).$$

5.4. Погрешность измерения неизменяемой части объёма газа V_0 .

Величина V_0 определяется по формуле (4):

$$V_0 = S(L_1 + L_2) + V_p.$$

Из этой формулы следует, что

$$\Delta(V_0) = (L_1 + L_2)\Delta(S) + 2S\Delta(L) + \Delta(V_p).$$

5.5. Погрешность измерения объёма газа V_0 .

Для измерения объёма газа используется формула (5):

$$V = V_T + V_0,$$

из которой следует, что

$$\Delta(V) = \Delta(V_T) + \Delta(V_0).$$

5.6. Погрешность измерения давления столба глицерина p_r .

Значение p_r определяется по формуле

$$p_r = \rho g(h_1 - h_2).$$

Если вы используете значение g , указанное на рабочем экране, то погрешностью $\Delta(g)$ можно пренебречь. Однако надо учесть, что давление столба глицерина может быть как положительным, так и отрицательным. Поэтому

$$\Delta(p_r) = g|h_1 - h_2|\Delta(\rho) + 2\rho g\Delta(h).$$

5.7. Погрешность измерения давления газа.

Давление газа определяется по формуле (6):

$$p = p_r + p_0,$$

из которой следует, что

$$\Delta(p) = \Delta(p_r) + \Delta(p_0).$$

5.8. Погрешность измерения массы газа.

Масса газа определяется по формуле (7)

$$m = \frac{\mu}{RT} pV.$$

Так как измерения произведения pV многократные, то можно оценить случайную погрешность $\Delta_{\text{сл}}(m)$:

$$\Delta_{\text{сл}}(m) = \frac{\mu}{RT} \Delta_{\text{сл}}(pV).$$

Для определения приборной погрешности $\Delta_{\text{пр}}(m)$ следует воспользоваться формулами

$$\varepsilon_{\text{пр}}(m) = \sqrt{\varepsilon^2(\mu) + \varepsilon^2(T) + \varepsilon^2(p) + \varepsilon^2(V)}, \quad \Delta_{\text{пр}}(m) = m\varepsilon_{\text{пр}}(m).$$

При этом не учтена погрешность универсальной газовой постоянной, что допустимо, если вы используете достаточно точное значение R , в котором не менее 5 значащих цифр. Погрешности $\varepsilon(p)$ и $\varepsilon(V)$ в разных опытах отличаются друг от друга, но эти отличия небольшие, поэтому можно использовать значения $\varepsilon(p)$ и $\varepsilon(V)$ для какого-то одного опыта – например, первого.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. В чём состоит закон Бойля – Мариотта?
- 6.2. При каких условиях выполняется закон Бойля – Мариотта?
- 6.3. Откуда следует закон Бойля – Мариотта?
- 6.4. Какое назначение у калориметра, которым в экспериментальной установке дополнен прибор Бойля?

- 6.5. Чью температуру показывает термометр в экспериментальной установке?
- 6.6. Какие формулы используются для измерения объёма газа?
- 6.7. Какие формулы используются для измерения давления газа?
- 6.8. Чего общего вы ожидаете от всех опытов, которые намерены провести?
- 6.9. Какова цель статистической обработки результатов опытов, которую вам предлагается проделать?

7. Рекомендуемая литература

- 7.1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. – М.: Наука, 1977–1985 г.
- 7.2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. – М.: Наука, 1989.
- 7.3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М., Высшая школа, 2003.
- 7.4. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2007.
- 7.5. Рипп А.Г. Обработка измерений: методическое пособие. – Севастополь: СНУЯЭП, 2012.

Учебное издание

**Рипп Александр Гешелевич
Мирошниченко Евгения Владимировна
Лисютин Виктор Александрович**

ЗАКОН БОЙЛЯ – МАРИОТТА

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 232/2025. Объем 1 п.л. Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 0,98.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»