

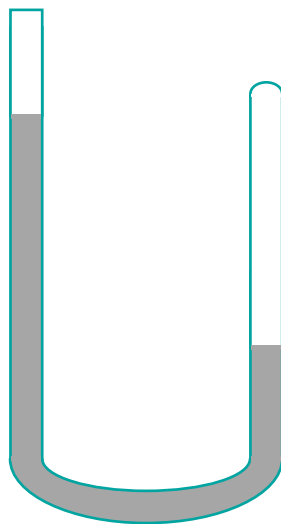
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

А.Г. Рипп, Е.В. Мирошниченко

ЗАКОН ШАРЛЯ

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

Рипп А. Г.

Р537 Закон Шарля: учебное пособие по общей физике для студентов технических и естественно-научных специальностей / А.Г. Рипп, Е.В. Мирошников; 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 один из важнейших газовых законов – закон Шарля 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 В. Закон Шарля

Цель работы

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

1. Краткая теория

Закон Шарля вам знаком ещё из курса физики средней школы. Он описывает изохорный процесс. Суть закона в том, что при изохорном нагревании идеального газа его давление p нарастает *прямо пропорционально абсолютной температуре T* . Этот закон является следствием уравнения Менделеева – Клапейрона

$$pV = \nu RT,$$

где ν – количество молей газа, T – абсолютная температура газа, R – универсальная газовая постоянная. Из этого уравнения следует:

$$p = \frac{\nu R}{V} T. \quad (1)$$

В изохорном процессе объём газа остаётся неизменным. Если при этом и количество газа в ходе процесса не изменяется, то множитель $\frac{\nu R}{V}$ в правой части уравнения (1) – это константа, что и доказывает пропорциональность между температурой и давлением идеального газа. Однако открывателю этого закона французскому учёному Жаку Шарлю уравнение Менделеева – Клапейрона было неизвестно, и свой закон он сформулировал на основании экспериментальных исследований. Это было сделано в конце 18 века, а первое сообщение о законе опубликовал в научной печати коллега Ж. Шарля французский учёный Жозеф Гей-Люссак в 1802 году. Ж. Гей-Люссак не претендовал на первенство, однако он внёс существенный научный вклад в исследование закона Шарля, поэтому закон Шарля называют ещё *вторым законом Гей-Люссака*. Сам Ж. Гей-Люссак в своей статье 1802 года называл его *законом объёмов*. Но ещё за сто лет до Ж. Шарля и Ж. Гей-Люссака (в 1700 – 1702 годах) пропорциональность между температурой газа и его давлением в изохорном процессе обнаружил третий француз – механик, физик и изобретатель Гийём Амонтон. Г. Амонтону это понадобилось при изобретении U-образного барометра и термометра.

В данной лабораторной работе вам предлагается экспериментальным путём проверить закон Шарля. Для этого предлагается воспользоваться *прибором Бойля*. Этот прибор – по сути разновидность ртутного U-образного барометра Г. Амонтона, то есть изогнутая U-образная стеклянная трубка, в которую налита ртуть – см. рисунок 1. Один конец трубки запаян (на рисунке 1 это – правое

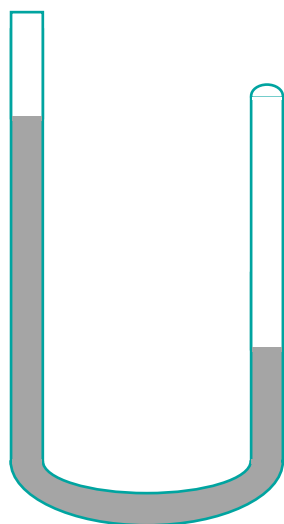


Рис. 1. Прибор Бойля

колени), и в нём над ртутью находится некоторая порция воздуха, которая и представляет собой объект исследования¹. Вторым конц трубки (левый) открыт в атмосферу. Роберт Бойль разработал свой прибор для того, чтобы исследовать связь между объёмом воздуха и его давлением. При добавлении ртути в открытое колено воздух в закрытом колене сжимается, и его давление нарастает. Зная площадь поперечного сечения трубки и измерив высоту части трубки, занятой воздухом, можно измерить объём воздуха V . А измерив разность уровней ртути в коленах и зная атмосферное давление, можно измерить давление воздуха p . В результате Р. Бойль обнаружил, что при постоянстве температуры (в изотермическом процессе) произведение давления газа на его объём pV – это константа².

Прибор Бойля можно использовать шире – не только для исследований особенностей изотермического процесса. В данной лабораторной работе, как уже указывалось, вам предлагается исследовать *изохорный* процесс.

2. Описание экспериментальной установки

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

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 (левое) колено U-образной трубки, но и удалять (желаемыми порциями). В реальности удалить порцию жидкости из трубки технически очень сложно, поэтому Роберт Бойль и его помощник Ричард Таунлей удаляли ртуть только на этапе подготовки эксперимента, а в ходе эксперимента они лишь малыми порциями доливали ртуть.

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

² Сейчас этот факт известен под названием «закон Бойля – Мариотта».

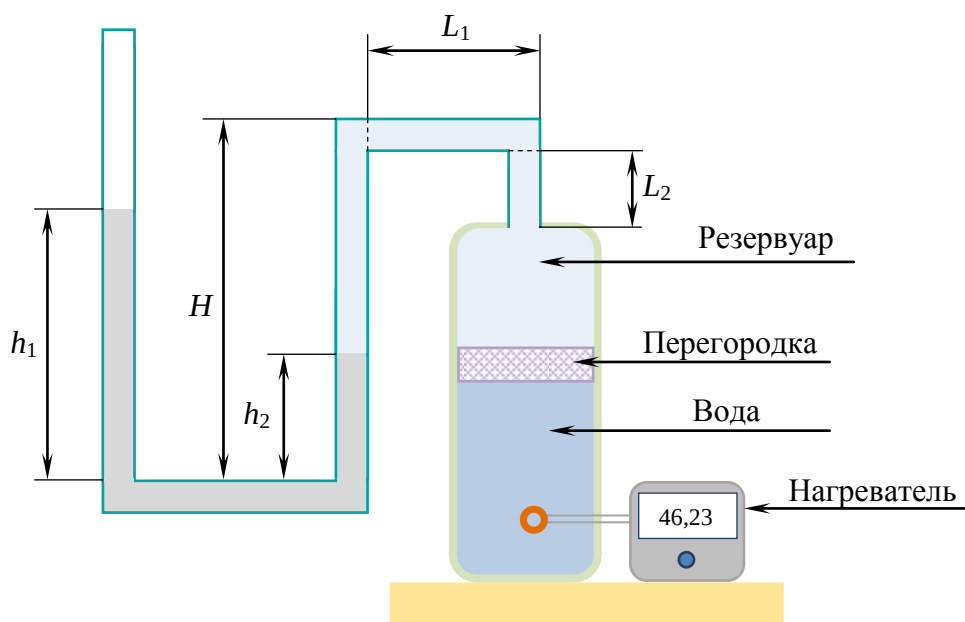


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

2. Рабочее вещество в установке (в закрытом колене U-образной трубки) – не воздух, а газ, который можно выбирать из предлагаемого списка. В 17 – 18 веках, когда работали Роберт Бойль, Жак Шарль и Жозеф Гей-Люссак, вообще не было ещё понятия «газ», никто не знал, что воздух – это 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 U-образной 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.

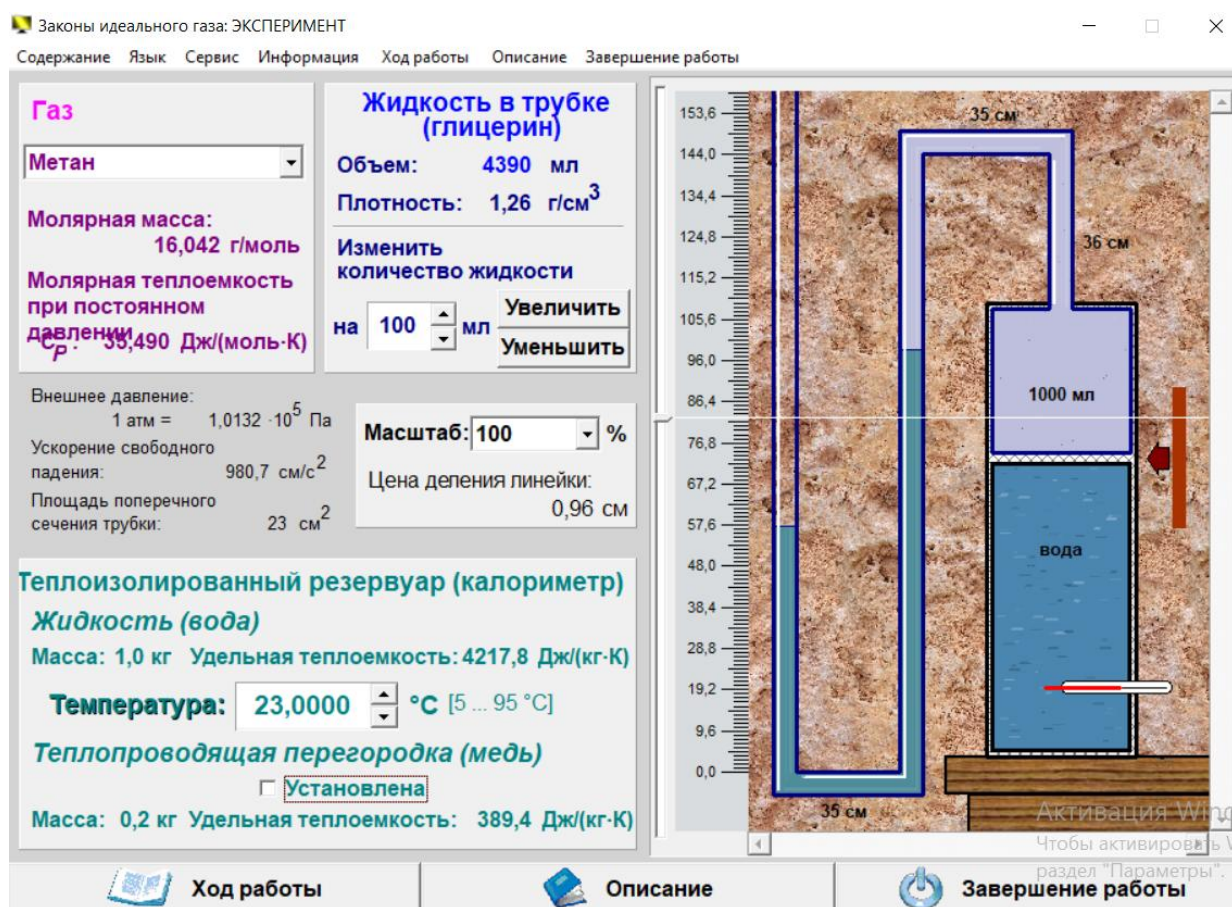


Рис. 3. Рабочий экран лабораторной установки (Окно **Эксперимент**)

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

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 U-образной трубке. Для этого предусмотрены две кнопки: **Увеличить** и **Уменьшить** и окошко, позволяющее выбрать объём одной порции глицерина в миллилитрах.

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 увеличивается 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 параметров газа

3.1 Измерение объёма

Газ занимает следующие две области.

- Резервуар.

Объём резервуара V_p показан в миллилитрах в области визуализации.

- Трубки.

Это основная трубка и две соединительные трубки.

Основная трубка – это правая часть U-образной трубки (закрытое колено), то есть 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 основной трубке равен

$$V_1 = S(H - h_2),$$

где S – площадь сечения трубки.

Две соединительные трубки. Одна из них горизонтальная, длиной L_1 , вторая – вертикальная, длиной L_2 . Объём газа в соединительных трубках равен

$$V_2 = S(L_1 + L_2).$$

Таким образом, объём газа в трубках равен

$$V_T = V_1 + V_2 = S(H - h_2 + L_1 + L_2), \quad (2)$$

Объём всего газа равен

$$V = V_p + V_T. \quad (3)$$

3.2 Измерение давления

В соответствии с законом Паскаля, давление газа равно давлению в открытом колене на высоте h_2 . Это давление складывается из давления столба глицерина p_r и атмосферного давления p_0 :

$$p = p_r + p_0, \quad p_r = \rho g(h_1 - h_2), \quad (4)$$

где ρ – плотность глицерина.

3.3 Измерение (установка) температуры

Температуру можно измерить с помощью термометра. Однако термометр в экспериментальной установке показывает температуру *воды*, а она не обязательно равна температуре газа. Для того, чтобы температуры газа и воды были одинаковы, необходимы, как уже указывалось выше, два условия.

- Между водой и газом должна быть установлена проводящая (медная) перегородка.
- Должен окончиться процесс релаксации, то есть теплообмен между водой и газом.

Поэтому процедура измерения (установки) температуры газа состоит в следующем.

- Сначала надо поставить *непроводящую* перегородку и стрелками установить нужную температуру воды – ту, которую надо сообщить газу.
- Затем надо заменить перегородку на *теплопроводящую*, после чего начнётся теплообмен между водой и газом, их температуры будут выравниваться, и показание термометра будет изменяться.
- 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 немного не та, которую надо установить. Поэтому надо снова поставить непроводящую перегородку и повторить всю процедуру снова. В результате разница между первоначальной температурой и конечной станет меньше. После нескольких повторений процедуры показания термометра в начале и в конце релаксации станут одинаковыми. Это и будет та температура газа, которую требуется установить.

3.4 Измерение массы

Масса газа в лабораторной установке – величина постоянная, это – не функция состояния. Её можно измерить, получив экспериментальную зависимость давления газа от температуры $p(T)$. Если эта зависимость подтвердит закон Шарля, то есть окажется прямо пропорциональной, то можно измерить коэффициент пропорциональности k . С другой стороны, в соответствии с уравнением (1), этот коэффициент связан с массой газа формулой

$$k = \frac{\nu R}{V} = \frac{mR}{\mu V}.$$

Из данной формулы следует, что измерение коэффициента пропорциональности позволяет измерить массу газа:

$$m = \frac{\mu V k}{R}. \quad (5)$$

4. Порядок выполнения работы

- 4.1. Выберите по согласованию с преподавателем газ, с которым вы будете проводить эксперимент. Внесите эту информацию в таблицу 1 и в соответствующие окошки рабочего экрана.
- 4.2. Установите температуру газа минимальной, то есть 5°C. Процедура установки температуры описана в пункте 3.3. Запишите значение температуры в первую строку таблицы 2 (соответствующую опыту № 1).
- 4.3. Установите масштаб 100%, а затем с помощью панели **Жидкость в трубке** установите такое количество жидкости, чтобы высота глицерина в открытом колене h_1 стала равной 5 см или меньше.
- 4.4. Увеличьте масштаб до 500% и измерьте, пользуясь вертикальной линейкой и её бегунком, высоту уровней жидкости в открытом и закрытом коленах h_1 и h_2 . Результат измерения h_2 запишите в таблицу 1, а результат измерения h_1 – в первую строку таблицы 2 (соответствующую опыту № 1).
- 4.5. 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, однако достаточно 5-6 значащих цифр.

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	μ	г/моль	
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	
Высота уровня жидкости в основной трубке	h_2	см	
Объём газа в трубках	V_T	мл	
Объём газа	V	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	
	$\Delta(V_T)$	мл	
	$\Delta(V)$	мл	
	$\Delta(p_0)$	Па	
	$\Delta(\rho)$	г/см ³	

- 4.6.** Установите масштаб 100%, а затем увеличьте температуру газа. Шаг изменения выберите сами – от 4 градусов до 10. Процедура установки температуры описана в пункте 3.3.
- 4.7.** В результате изменения температуры изменится давление газа, что приведёт к изменению высоты уровня жидкости в закрытом колене h_2 . Однако для того, чтобы процесс был изохорным, значение h_2 должно быть постоянным. Этого можно добиться изменением количества жидкости в трубке. С помощью панели **Жидкость в трубке** добейтесь, чтобы высота уровня жидкости в закрытом колене h_2 стала такой же, как и в первом опыте (значение h_2 у вас записано в таблице 1). Для наиболее точной установки высоты уровня h_2 используйте максимальный масштаб (500%) и минимальный шаг изменения количества жидкости. После завершения этого пункта измерьте высоту уровня в открытом колене h_1 (при масштабе 500%) и запишите значения T и h_1 в таблицу 2.

- 4.8.** Повторяйте опыты (то есть пункты 4.6 и 4.7) до тех пор, пока позволяет установка – у неё есть предел увеличения температуры и предел увеличения количества жидкости.

Таблица 2

Зависимость давления газа p от его температуры T при постоянном объёме

Номер опыта	T		h_1	V	p_r	$\Delta(p_r)$	p
	град. Ц.	К	см	л	Па	Па	кПа
1							
2							
...							
...							

- 4.9.** Заполните остальные столбцы таблицы 2. Обратите внимание на единицы измерения и не ошибитесь при их переводе.
- 4.10.** На основании данных таблицы 2 постройте график экспериментальной зависимости давления газа p от его температуры T . Вставьте планки погрешностей и линию тренда.
- 4.11.** Прокомментируйте построенный график.
- 4.12.** Если ваши эксперименты подтвердили закон Шарля, используйте полученные результаты для измерения массы газа. Для этого воспользуйтесь функцией ЛИНЕЙН, формулой (6) $m = \frac{\mu V k}{R}$ и таблицей 3.

Таблица 3

Измерение массы газа m

Величина	k	m
Размерность	кПа/К	г
Значение		
Абсолютная погрешность		
Относительная погрешность		

- 4.13.** Запишите результат измерения массы газа в стандартном виде и прокомментируйте результат.
- 4.14.** Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

5. Оценка погрешностей измерений

5.1. Погрешности прямых измерений.

Прямым способом измеряются высота уровней жидкости в коленах 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 сан-

тиметров, 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 трубках V_T .

Величина V_T определяется по формуле (2):

$$V_T = S(H - h_2 + L_1 + L_2),$$

из которой следует, что

$$\Delta(V_T) = (H - h_2 + L_1 + L_2)\Delta(S) + S[\Delta(H) + \Delta(h) + 2\Delta(L)].$$

Длина основной трубки H и высоты уровней h_1 и h_2 измеряются одной и той же вертикальной линейкой, поэтому их погрешности $\Delta(H)$ и $\Delta(h)$ одинаковы, так что

$$\Delta(V_T) = (H - h_2 + L_1 + L_2)\Delta(S) + 2S[\Delta(h) + \Delta(L)].$$

5.4. Погрешность измерения объёма газа V .

Величина V определяется по формуле (3):

$$V = V_p + V_T,$$

откуда следует, что

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

5.5. 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

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

5.6. Погрешность измерения давления газа.

Давление газа определяется по формуле (6):

$$p = p_r + p_0,$$

из которой следует, что

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

5.7. Погрешность измерения массы газа.

Масса газа определяется по формуле (5)

$$m = \frac{\mu V k}{R},$$

где k – коэффициент пропорциональности между давлением газа и его температурой, который измеряется с помощью функции ЛИНЕЙН. Если вы используете значение универсальной газовой постоянной R с точностью до 5 – 6 значащих цифр, то погрешностью $\Delta(R)$ можно пренебречь. Молярная масса газа задана тоже с высокой точностью (5 значащих цифр), поэтому её погрешность тоже можно не учитывать. В итоге из формулы (5) следует:

$$\varepsilon(m) = \varepsilon(V) + \varepsilon(k), \quad \Delta(m) = m\varepsilon(m).$$

6. Контрольные вопросы

- 6.1. В чём состоит закон Шарля?
- 6.2. При каких условиях выполняется закон Шарля?
- 6.3. Откуда следует закон Шарля?
- 6.4. Какое назначение у калориметра, которым в экспериментальной установке дополнен прибор Бойля?
- 6.5. Чью температуру показывает термометр в экспериментальной установке?
- 6.6. При каком условии термометр в калориметре показывает температуру газа?
- 6.7. Какие формулы используются для измерения объёма газа?
- 6.8. Каким образом в данной работе можно при изменении температуры газа не изменить его объём?
- 6.9. Какие формулы используются для измерения давления газа?
- 6.10. Какую физическую величину нужно измерить в данной работе для того, чтобы узнать массу газа?

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**

ЗАКОН ШАРЛЯ

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 231/2025. Объем 1 п.л. Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 0,98.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»