

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



А.Г. Рипп, О.В. Матузаева

Падение шарика в газе

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

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 53.08 (075.8)

P537

Р е ц е н з е н т:

Л.В. Третьякова - доктор физико-математических наук, профессор

Рипп А.Г.

P537 Падение шарика в газе: учеб. пособие по общей физике / А.Г. Рипп, О.В. Матузаева. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 10 с.

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 особенностями движения твёрдого тела в среде – в частности, в газообразной, с методами экспериментальной проверки характера движения и с одним из методов измерения параметров системы – в частности, ускорения падающего тела и плотности среды. 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 53.08 (075.8)

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Физика», протокол № 11 от 25 июня 2018 г.

Работа 32А. Падение шарика в газе

Цель работы

Целью данной лабораторной работы является:

- исследование характера падения твёрдого шарика в газе;
- измерение плотности газа.

1. Краткая теория

Пусть в некотором закрытом сосуде, заполненном газом, падает из состояния покоя твёрдый шарик. Характер его падения можно узнать из второго закона Ньютона. Для этого сначала нужно выяснить, какие силы действуют на падающий шарик. Этим сил три – см. рисунок 1.1.

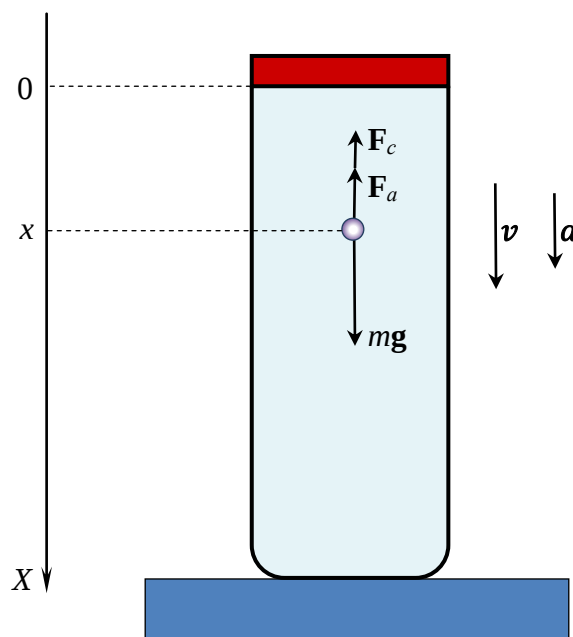


Рис. 1.1. Силы, действующие на шарик

- Сила тяжести $\mathbf{G} = m\mathbf{g}$, направленная вниз.
- Сила Архимеда $\mathbf{F}_a$, направленная вверх и равная по закону Архимеда

$$F_a = \rho V g,$$

где ρ – плотность газа, V – объём шарика. Плотность газа ρ значительно меньше плотности твёрдого шарика ρ_0 , поэтому сила Архимеда мала по сравнению с силой тяжести $G = mg = \rho_0 V g$, так что шарик в газе не плавает и, тем более, не всплывает, а падает вниз.

- Сила сопротивления газа $\mathbf{F}_c$, направленная против скорости шарика, то есть вверх. Второе название этой силы – сила внутреннего трения. Сила сопротивления растёт с ростом скорости падения шарика. Если, однако, высота сосуда не слишком велика (не более нескольких десятков метров), то шарик не успевает разогнаться до такой скорости, при которой сила сопротивления может достигнуть хотя бы малой си-

лы Архимеда. В предлагаемой вам лабораторной установке высота сосуда чуть больше 4 метров. Поэтому в такой ситуации силой сопротивления можно пренебречь.

Итак, сложим две силы, действующие на падающий шарик, и запишем для него второй закон Ньютона.

$$a = \frac{mg + F_a}{m}.$$

Запишем это уравнение в проекциях на вертикальную ось OX с учётом формулы для силы Архимеда:

$$a = \frac{mg - \rho V g}{m} = g \left(1 - \frac{\rho V}{m} \right) = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right). \quad (1.1)$$

Из уравнения видно, что ускорение шарика не зависит от времени, так что движение шарика – *равноускоренное*. Обратите внимание: в случае, если высота сосуда более нескольких десятков метров, силой сопротивления пренебрегать нельзя. А так как эта сила зависит от скорости шарика, то и ускорение шарика тоже зависит от скорости, а значит, и от времени. Следовательно, в этом случае падение шарика – не равноускоренное. Таким образом, критерием того, влияет ли сила сопротивления на движение шарика, является *характер его движения*:

- если шарик падает равноускоренно, то сила сопротивления на него практически не действует;
- если шарик падает не равноускоренно, то причиной этого является существенное влияние силы сопротивления.

2. Методика эксперимента

Убедиться в том, что шарик в газе действительно падает равноускоренно, очень просто. Согласно кинематике равноускоренного движения с нулевой начальной скоростью, зависимость координаты шарика от времени t – квадратичная:

$$x(t) = \frac{at^2}{2}. \quad (1.2)$$

Итак, надо провести эксперимент, измеряя путь x , пройденный шариком в течение различных интервалов времени t , то есть получить экспериментальную зависимость $x(t)$, а затем построить график зависимости $x(t)$. Если точки на графике лягут на параболу, то формула (1.2) будет подтверждена и тем самым будет подтверждено равноускоренное падение шарика и отсутствие влияния на движение шарика силы сопротивления.

Второй способ проверки формулы (1.2) основан на её линеаризации, то есть приведении к линейной зависимости. Это можно сделать, введя вспомогательную величину $y = \frac{t^2}{2}$. В результате координата шарика оказывается прямо пропорциональной величине y :

$$x(y) = at. \quad (1.3)$$

Поэтому надо построить график зависимости $x(y)$. Если точки на графике лягут на прямую линию, проходящую через начало координат, то формулы (1.3) и (1.2) будут подтверждены и тем самым будут подтверждено равноускоренное падение шарика и отсутствие влияния на движение шарика силы внутреннего трения.

После этого можно измерить ускорение шарика, которое равно коэффициенту пропорциональности между x и y . Результат измерения затем можно использовать для определения плотности газа ρ , если известна плотность шарика ρ_0 , так как из (1.1) следует:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{a}{g}\right).$$

3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка – *виртуальная*. Она разработана в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

При вызове программы открывается окно «*Движение тела в вязкой среде*». 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 в данном пособии вам предлагается порядок выполнения лабораторной работы, который несколько отличается от того, который предлагают разработчики программы.
- **Эксперимент.** При нажатии на эту кнопку открывается окно с экспериментальной установкой.
- **Завершение работы.** Эта кнопка вызывает выход из программы.

Окно «Эксперимент» показано на рис. 3.1.

Оно содержит три раздела: панель условий эксперимента (слева сверху), инструментальная панель (слева внизу) и окно визуализации (справа).

1. *Панель условий эксперимента* содержит окно «**СРЕДА**» для выбора типа среды: «**Тяжёлые жидкости**», «**Лёгкие жидкости**», «**Газы**» и линейку с бегунком «**Масса**» для выбора массы шарика. Кроме того, на этой панели указано вещество, из которого изготовлен шарик (пластмасса плотностью $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$) и радиус шарика в см.

2. В *окне визуализации* виден сосуд с жидкостью, падающий шарик и линейка (h , см). Рядом с сосудом (справа) расположены на одинаковом расстоянии друг от друга датчики, реагирующие на пролетающий мимо них шарик. Датчики не показаны, но показаны горизонтальными линиями уровни, на которых находятся датчики.

3. *Инструментальная панель* содержит линейку с бегунком «**Расстояние между датчиками**», окно «**Время**», окно «**Время прохождения телом датчиков**» и две кнопки: «**Начать ЭКСПЕРИМЕНТ**» и «**Начальное положение**».

- Расстояние между метками можно изменять в диапазоне от 20 до 40 см.
- В окне «**Время**» отображается полное время движения шарика, то есть время его падения на дно сосуда.
- В окне «**Время прохождения телом датчиков**» отображаются моменты прохождения шарика мимо всех датчиков.
- Кнопка «**Начать ЭКСПЕРИМЕНТ**» запускает шарик. После нажатия этой кнопки шарик в окне визуализации начинает движение, а кнопка превращается в кнопку «**Остановить ЭКСПЕРИМЕНТ**».

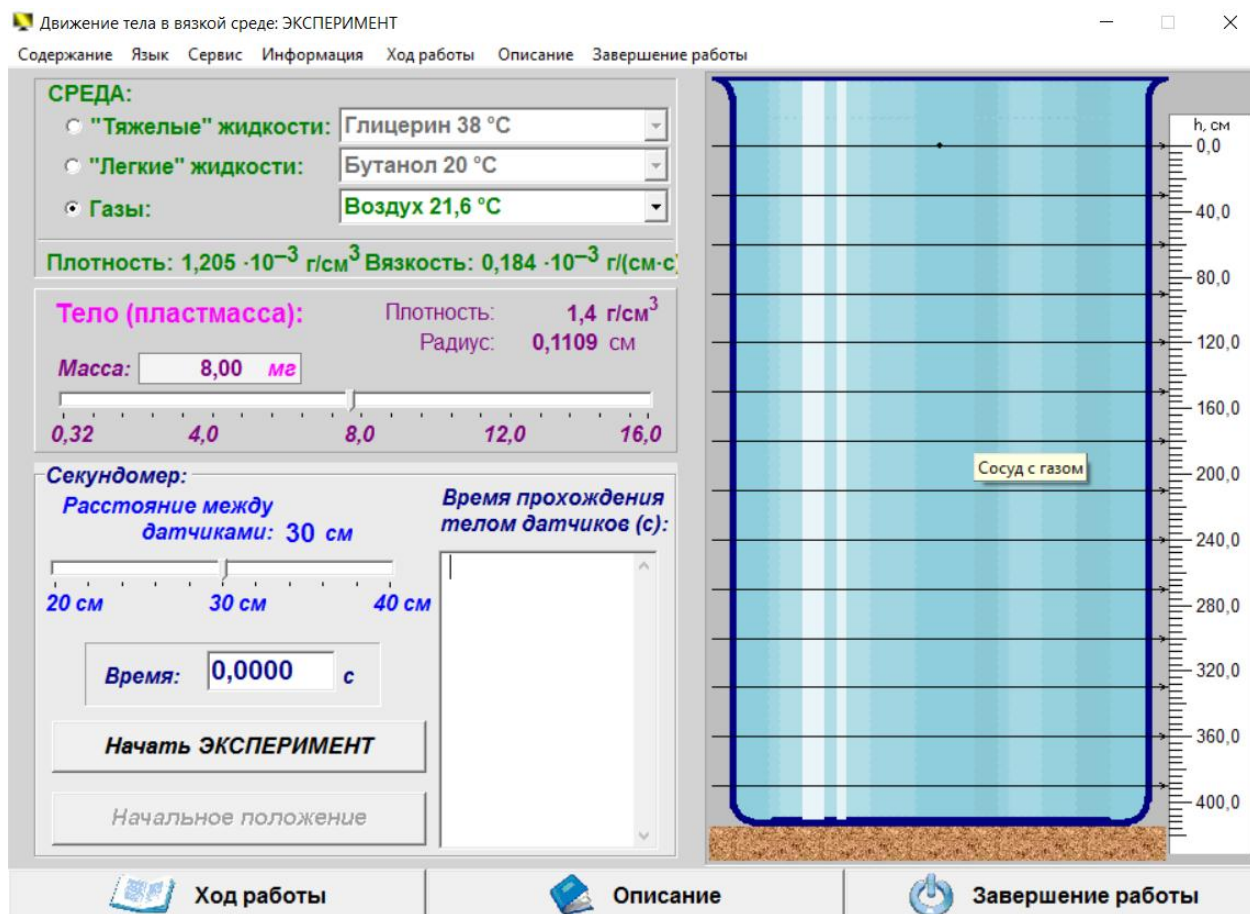


Рис. 3.1. Окно «Эксперимент»

4. Порядок выполнения работы

- 4.1. Нажмите кнопку «**Эксперимент**» и обратитесь к преподавателю для того, чтобы он выбрал для вас среду и шарик. После этого заполните табл. 1.

Условия эксперимента

Газ			
Плотность газа	ρ	г/см ³	
Масса шарика	m	мг	
Радиус шарика	r	см	
Плотность шарика	ρ_0	г/см ³	
Расстояние между датчиками	s	см	
Ускорение свободного падения	g	м/с ²	
Погрешности прямых измерений и заданных величин	$\Delta(x)$	см	
	$\Delta(t)$	с	
	$\Delta(\rho)$	г/см ³	
	$\Delta(m)$	мг	
	$\Delta(r)$	см	
	$\Delta(\rho_0)$	г/см ³	
	$\Delta(g)$	м/с ²	

Расстояние между датчиками s выберите самостоятельно.

Плотность шарика ρ_0 , указанная на панели условий эксперимента (1,4 г/см³), задана с низкой точностью – всего 2 значащие цифры, но её можно узнать точнее, так как заданы радиус и масса шарика. Для этого используйте формулу

$$\rho_0 = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3}.$$

- 4.2. Нажмите кнопку «**Начать ЭКСПЕРИМЕНТ**». Шарик начнёт падать, а в окне «**Время прохождения телом датчиков**» будут появляться числа. После окончания эксперимента, то есть после падения шарика на дно сосуда, перенесите информацию из окна «**Время прохождения телом датчиков**» в столбец « t » таблицы 2.
- 4.3. Нажмите кнопку «**Завершение работы**».
- 4.4. Заполните в таблице 2 столбец « x ».
- 4.5. Заполните в таблице 2 столбец « y », используя формулу $y = \frac{t^2}{2}$, и столбец с погрешностями $\Delta(y)$.

Т а б л и ц а 2

Зависимость координаты шарика x от времени t

Номер датчика	x	t	$y = \frac{t^2}{2}$	$\Delta(y)$
	см	с	с ²	с ²
1	0	0		
2				
...				
...				

4.6. На основании данных таблицы 2 можно построить два графика:

- график зависимости $x(t)$;
- график линеаризованной зависимости $x(y)$.

Выберите сами, будете ли вы строить оба графика или какой-то один из них. Не забудьте нанести на графиках планки погрешностей.

4.7. Нанесите на графики (график) линию тренда. Для графика зависимости $x(t)$ в параметрах линии тренда надо выбрать «Полиномиальная», «Степень» – 2, «Показывать уравнение на диаграмме», а в окне «Настроить пересечение» вписать 0. Для графика линеаризованной зависимости $x(y)$ в параметрах линии тренда надо выбрать «Линейная», «Показывать уравнение на диаграмме», а в окне «Настроить пересечение» вписать 0.

Прокомментируйте результат.

4.8. Для измерения ускорения падения шарика a целесообразно использовать тот факт, что ускорение a является коэффициентом пропорциональности в линеаризованной зависимости (1.3):

$$x(y) = at.$$

Поэтому вы можете определить значение a и оценить абсолютную погрешность измерения $\Delta(a)$ с помощью функции ЛИНЕЙН.

Зная ускорение шарика, можно определить плотность газа ρ по формуле $\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{a}{g}\right)$.

Итак, определите значения ускорения шарика и плотность газа ρ , для чего используйте табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Ускорение шарика и плотность газа

Величина	a	ρ
Размерность	см/с ²	г/см ³
Значение		
Абс. погрешность		
Относ. погрешность		

4.9. Запишите результат измерения ускорения падения шарика и плотности газа в стандартной форме:

$$a = (\dots \pm \dots) \text{ м/с}^2, \quad \varepsilon(a) = \dots\%.$$

$$\rho = (\dots \pm \dots) \text{ г/см}^3, \quad \varepsilon(\rho) = \dots\%.$$

4.10. Сравните измеренное и заданное значения плотности газа и прокомментируйте результат.

4.11. Отметьте в отчёте точности измерения ускорения шарика и плотности газа.

4.12. Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

5. Оценка погрешностей измерений

5.1. Погрешности прямых измерений.

Прямым способом в данной работе измеряются четыре величины: координата шарика x , время движения шарика мимо датчиков t , масса шарика m и радиус шарика r .

Координата шарика x определяется расстоянием между датчиками, которое задаётся в сантиметрах с помощью линейки с бегунком и высвечивается над линейкой в виде целого числа. Поэтому $\Delta(x) = 1$ см. Однако числа на линейке в окне визуализации указаны с точностью до десятых долей см, так что можно принять погрешность координаты шарика $\Delta(x) = 0,1$ см.

Время движения шарика мимо датчиков t вы видите в соответствующем окне в секундах в виде числа с четырьмя знаками после запятой. Таким образом, $\Delta(t) = 0,0001$ с.

Массу шарика m вы видите в окне «**Масса**» в миллиграммах в виде числа с тремя знаками после запятой. Следовательно, $\Delta(m) = 0,001$ мг.

Радиус шарика r вы видите в разделе «**Тело**» в сантиметрах в виде числа с четырьмя знаками после запятой, так что $\Delta(r) = 0,0001$ см.

5.2. Погрешности заданных величин.

На панели условий эксперимента заданы три величины: плотности среды и шарика ρ и ρ_0 и динамическая вязкость среды η .

Погрешность $\Delta(\eta)$ вам не понадобятся.

Плотность шарика ρ_0 задана с низкой точностью, поэтому вам предложено определять её по формуле $\rho_0 = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3}$. Из этой формулы следует, что

$$\varepsilon(\rho_0) = \varepsilon(m) + 3\varepsilon(r), \quad \Delta(\rho_0) = \rho_0 \varepsilon(\rho_0).$$

Плотность газа ρ задана в г/см³ в виде числа с тремя знаками после запятой, умноженного на 10^{-3} . Поэтому $\Delta(\rho) = 0,001 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3$.

Ускорение свободного падения. В районе Севастополя оно равно $(9,807 \pm 0,002) \text{ м/с}^2$.

5.3. Погрешность измерения вспомогательной величины $y = \frac{t^2}{2}$.

В соответствии с общей формулой,

$$\Delta(y) = \left| \frac{d \frac{t^2}{2}}{dt} \right| \Delta(t) = t \Delta(t).$$

5.4. Погрешность измерения плотности газа ρ .

Для измерения плотности газа используется формула: $\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{a}{g}\right)$, из неё следует:

$$\varepsilon(\rho) = \varepsilon(\rho_0) + \varepsilon\left(1 - \frac{a}{g}\right), \quad \Delta(\rho) = \rho \varepsilon(\rho),$$

$$\varepsilon \left(1 - \frac{a}{g}\right) = \frac{\Delta \left(1 - \frac{a}{g}\right)}{1 - \frac{a}{g}} = \frac{\Delta \left(\frac{a}{g}\right)}{1 - \frac{a}{g}} = \frac{\frac{a}{g} \varepsilon \left(\frac{a}{g}\right)}{1 - \frac{a}{g}} = \frac{\varepsilon(a) + \varepsilon(g)}{\frac{g}{a} - 1}.$$

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Какие силы действуют на шарик, падающий в газе?
- 6.2. Почему твёрдый шарик не может плавать в газе?
- 6.3. В каком случае сила сопротивления оказывает заметное влияние на характер падения шарика?
- 6.4. Как ещё называется сила сопротивления газа?
- 6.5. От чего зависит сила сопротивления газа?
- 6.6. Каков в данной лабораторной работе характер падения шарика в газе?
- 6.7. От чего зависит ускорение падения шарика в газе?
- 6.8. Как вы будете определять плотность шарика?
- 6.9. Какую физическую закономерность требуется экспериментально проверить в данной лабораторной работе?
- 6.10. Непосредственно задачей экспериментов является исследование зависимости между некоторыми измеряемыми прямым способом физическими величинами. Что это за величины?
- 6.11. Какие графики вы собираетесь построить при обработке результатов измерений?
- 6.12. Какую физическую величину, характеризующую газ, предлагается измерить в данной лабораторной работе?

7. Рекомендуемая литература

- 7.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. – М., Наука, 1989.
- 7.2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1976.
- 7.3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М., Высшая школа, 2003.
- 7.4. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск: Издательство НИ ТПУ, 2007.
- 7.5. Рипп А.Г. Обработка измерений: метод. пособие. – Севастополь: СНУЯЭП, 2012.

Учебное издание

**Рипп Александр Гешелевич
Матузаева Ольга Вячеславовна**

Падение шарика в газе

Учебное пособие по общей физике

В авторской редакции

Изд. № 144/18. Объем 0,75 п.л.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»