

Лабораторная работа № 1.3¹⁾

Измерение скорости движения пули

Введение

В работе используются два метода измерения скорости полета пули: кинематический и динамический.

Кинематический метод (см. рис. 3.1) основан на том, что за время t , в течение которого пуля пролетает известное расстояние d между равномерно вращающимися бумажными дисками, они поворачиваются на угол φ . На рис. 3.1 точки A и A' , в которых пуля пробила бы диски, если бы они были неподвижны.

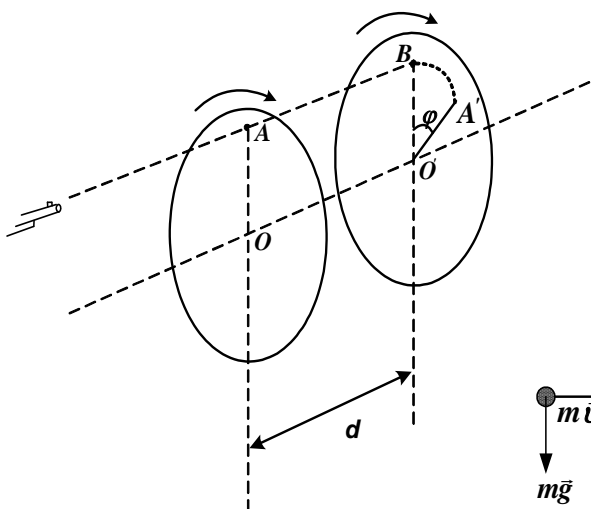


Рис. 3.1.

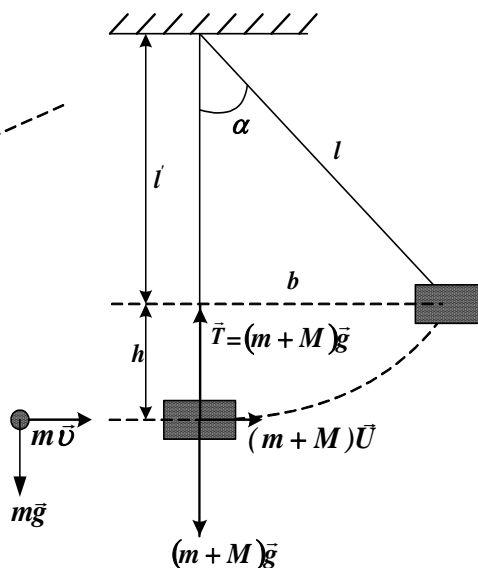


Рис. 3.2.

В случае вращающихся дисков пуля пробивает второй диск в точке B . Тогда, записав соответствующие кинематические соотношения для движения пули между дисками и вращения дисков, легко получить, что скорость пули v находится по формуле

$$v = \omega d / \varphi, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения дисков.

В **динамическом** методе скорость пули определяется по отклонению маятника b после неупругого столкновения его с летящей пулей (см. рис. 3.2), причем считается, что $b \ll l$. Этот метод позволяет с помощью законов сохранения импульса и энергии рассчитать скорость пули (см. [5]). Рассмотрим момент соударения пули с массивным маятником. Рассматриваемая система тел не является замкнутой, так как на нее действуют внешние силы: силы тяжести пули и маятника и сила натяжения нити маятника, пренебречь которыми нельзя. Однако в момент соударения проекции этих сил на горизонтальную ось равны нулю, следовательно, сохраняется проекция механического импульса на горизонтальную ось OX – направление полета

¹⁾ Подготовлено преподавателями КОЭФ Александровым В.Н., и Васильевой И.А. и Коротаевой Е.А.

пули. Поэтому, записав для пули и системы «пуля + маятник» закон сохранения импульса вдоль оси OX (см. рис. 3.2) и учитывая, что масса маятника M много больше массы пули m ($M \gg m$), можно получить, что скорость системы u после удара равна:

$$u = m v / (M + m) \approx m v / M, \quad (2)$$

где v – скорость пули до удара.

После удара пули маятник, получив скорость u , отклонился на угол α (см. рис. 3.2). Пренебрегая потерями энергии на сопротивление воздуха, можно записать закон сохранения механической энергии для системы «пуля + маятник» после удара и найти высоту h , на которую поднялся центр масс системы:

$$h = u^2 / 2g. \quad (3)$$

Так как по условию эксперимента $b \ll l$, то высота равна:

$$h = l - l' = l - \sqrt{l^2 - b^2} = l(1 - \sqrt{1 - b^2/l^2}) \cong b^2 / 2l. \quad (4)$$

Из (1) – (3) получаем:

$$v = (bM / m) \sqrt{g / l}. \quad (5)$$

Удар пули о маятник неупругий, так как значительная часть кинетической энергии летящей пули после соударения с маятником переходит во внутреннюю энергию системы (расходуется на неупругую деформацию маятника и пули и т.п.).

Экспериментальные задачи, поставленные в работе:

- изучение кинематического и динамического методов измерения больших скоростей;
- нахождение ошибок прямых и косвенных измерений.

Описание экспериментальной установки

Кинематический метод. На пути движения пули устанавливаются два бумажных диска, закрепленных на оси, параллельной направлению движения пули (см. рис. 3.1). Расстояние между дисками фиксировано. Диски приводятся во вращение электродвигателем. После выстрела электродвигатель выключается, бумажные диски снимаются и накладываются друг на друга на специальный столик с крепящим устройством, таким же, как и на оси электродвигателя. На верхнем диске проводятся линии, соединяющие центр диска с пробитыми пулей дырочками на первом и втором диске. Полученный угол φ измеряется транспортиром.

Динамический метод. На пути движения пули устанавливается массивный маятник, подвешенный на длинных нитях (см. рис. 3.2). Центральная часть маятника заполнена пластилином. Летящая пуля, врезаясь в маятник, застревает в пластилине, передавая маятнику свой импульс. Отклонение маятника b по горизонтали отсчитывается по шкале (на рис. 3.2 шкала не показана).

Подготовка протокола к работе

(Выполняется во внеаудиторное время при подготовке к занятию)

Запишите в лабораторной тетради номер и название работы.

Запишите в тетради заголовок: «**Задание 1. Определение скорости пули кинематическим методом**».

Запишите расчетные формулы с расшифровкой буквенных обозначений для вычисления скорости пули кинематическим методом и определения абсолютной и относительной ошибок этого измерения (см. **Приложение** и **В4** [4]).

Подготовьте табл. 1.

Табл. 1

d , м	n , об/мин	ω , с ⁻¹	φ , рад	v_k , м/с	ε_{v_k} , %	Δv_k , м/с

Запишите в тетради заголовок: «**Задание 2. Определение скорости пули динамическим методом**».

Запишите расчетные формулы с расшифровкой буквенных обозначений для вычисления скорости пули динамическим методом и определения абсолютной и относительной ошибок этого измерения (см. **Приложение** и **В4** [4]).

Подготовьте табл. 2.

Табл. 2

M , кг	l , м	m , кг	b , м	v_{∂} , м/с	$\varepsilon_{v_{\partial}}$, %	Δv_{∂} , м/с

Измерения и обработка результатов

Задания 1 и 2 выполняются параллельно, а их обработка проводится последовательно.

1. Приготовьте два бумажных диска, напишите на них номера 1 и 2 и закрепите их на оси двигателя так, чтобы обозначенные стороны были обращены к стволу ружья.

Запишите в тетрадь паспортные данные установки: частоту вращения двигателя n (об/мин), расстояние между дисками d , длину l и массу маятника M и ошибки их измерения. Взвесьте пулю, пересчитайте n в ω и запишите в тетрадь как результаты, так и ошибки измерения m и вычисления ω .

2. Закрепите бумажные диски на оси установки и зарядите ружье.

Указание. Ружье заряжайте и стреляйте из него только в присутствии преподавателя или инженера!

3. Включите двигатель, вращающий диски. Произведя выстрел, визуально зафиксируйте максимальное отклонение маятника b по шкале и запишите это

значение в тетрадь. Выключите двигатель. Снимите бумажные диски, совместите их так, чтобы измерить угол поворота одного диска относительно другого φ (см. рис. 3.1) и запишите это значение в тетрадь.

4. Рассчитайте скорость пули кинематическим методом. Данные измерений и вычислений внесите в табл. 1. Рассчитайте относительную ε_{v_k} абсолютную Δv_k ошибки косвенных измерений скорости пули кинематическим методом.

5. Рассчитайте скорость пули динамическим методом. Данные измерений и вычислений внесите в табл. 2. Рассчитайте относительную ε_{v_d} и абсолютную Δv_d косвенных измерений скорости пули динамическим методом.

Приложение

Используя порядок нахождения относительной ошибки косвенных измерений, рассмотренный в разделе **В4** [4], и формулы (1) и (5), можно получить сначала относительную ошибку косвенных измерений скорости

$$\text{для кинематического метода: } \varepsilon_{v_k}^2 = \varepsilon_{\omega}^2 + \varepsilon_d^2 + \varepsilon_{\varphi}^2,$$

где ε_{ω} , ε_d и ε_{φ} – относительные ошибки прямых измерений ω , d и φ , соответственно;

$$\text{для динамического метода: } \varepsilon_{v_d}^2 = \varepsilon_b^2 + \varepsilon_M^2 + \varepsilon_m^2 + 0,25 \cdot \varepsilon_g^2 + 0,25 \cdot \varepsilon_l^2,$$

где ε_b , ε_M , ε_m , ε_g и ε_l – относительные ошибки измерений b , M , m , g и l , соответственно,

а затем их соответствующие абсолютные ошибки как

$$\Delta v_k = v_k \cdot \varepsilon_{v_k} \quad \text{и} \quad \Delta v_d = v_d \cdot \varepsilon_{v_d}.$$

Рекомендуемая литература:

1. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н. Курс общей физики. Механика» (2001), гл. 1, § 1.1 – 1.6, гл. II, § 2.1 – 2.9, гл. IV, § 4.5.

2. Иродов И.Е., Механика. Основные законы (11-е изд., 2013), гл. III, § 3.1. – 3.3, гл. IV, § 4.1.– 4.6.

3. Савельев И.В. Курс общей физики в 5 томах, т. 1, Механика (5-е изд., 2011), гл.1, §1.5, гл. 2, гл. 3, § 3.1 – 3.7, 3.10, 3.11.

4. Введение в физический практикум.

5. Сивухин Д.В. Общий курс физики в 5-ти томах, т. 1, Механика (4-е изд., 2005), § 26.

Примерные контрольные вопросы

1. Как можно объяснить расхождение в значениях скорости пули, полученных из данных кинематического и динамического методов?

2. Как рассчитать изменение внутренней энергии системы «маятник–пуля» при неупругом ударе?

3. Как изменятся результаты эксперимента, если пуля влетает в маятник под некоторым углом β к горизонту?

4. Чему равно натяжение нитей маятника до удара пули и непосредственно после удара?

5. Как направлено и чему равно ускорение материальной точки при ее движении по окружности с постоянной по величине скоростью? Является ли это движение равномерным или равноускоренным?

6. Можно ли считать равноускоренными движениями:

а) падение куска мела со стола?

б) падение листа с дерева на землю?

в) полет парашютиста до раскрытия парашюта?

г) полет парашютиста после раскрытия парашюта?

д) полет спутника по круговой орбите?

7. Какую скорость – среднюю или мгновенную – вы определяете с помощью установки лабораторной работы № 1.3 кинематическим методом и динамическим методом?

8. Как рассчитать, на какую максимальную высоту поднимется тело, брошенное вертикально вверх со скоростью v_0 ? Через какое время оно вернется обратно?

9. Является ли система «пуля – маятник» замкнутой? Как рассчитать скорость маятника после попадания в него пули?

10. Сохраняется ли механическая энергия системы «пуля – маятник» при ударе пули о маятник?

11. Рассчитайте, какая доля кинетической энергии пули переходит во внутреннюю энергию пули и маятника при их соударении.

12. Сравните величины скорости пули v_k и v_d и укажите возможные причины расхождения результатов.

13. Выведите формулы для оценки погрешности определения скорости пули кинематическим и динамическим методами.