МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЁТА ПУЛИ

Отчёт о практике

студентов 1 курса 151 группы
направления 09.03.04 — Программная инженерия
факультета КНиИТ
Тюменцева Радомира Александровича, Железко Александра Дмитриевича

Проверено:

____

Саратов 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель работы и принадлежности

Цель работы: ознакомление с баллистическим методом измерения, определение скорости полета пули с помощью баллистического маятника, оценка точности метода измерения.

Принадлежности:

1. Баллистический маятник
2. Пружинная пушка
3. Шкала для отсчета
4. Шомпол
5. Набор пуль
6. Технические весы
7. Набор гирь и разновесок

2 Теория

Измерение ряда физических величин может быть сведен к измерению пропорционального импульса силы. Если на находящийся в равновесии маятник воздействовать импульсом силы так, что маятник за время действия силы не успевает существенно отклониться от положения равновесия, то первое максимальное отклонение маятника от полученного толчка — баллистический отброс — пропорционально импульсу силы. Следовательно, измерение физической величины можно свести к измерению баллистического отброса. В этом и состоит баллистический метод измерения, используемый в таких приборах, как баллистический гальванометр, баллистические весы и динамометр, баллистический маятник.

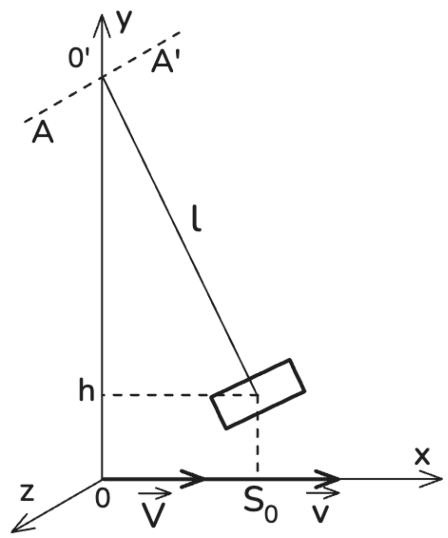

Рис. 1: Баллистический маятник

Баллистический маятник — прибор, применяемый для измерения начальных скоростей пуль или снарядов. Прямое измерение скоростей пуль весьма сложно, так как эта скорость достигает значительной величины (800-1000 м/с и выше). Метод баллистического маятника позволяет свести измерение скорости пули к измерению отклонения сравнительно медленного движущегося маятника после абсолютно неупругого удара с пулей.

Для упрощения расчетов баллистический маятник выполняют в таком виде, чтобы его можно было рассматривать как математический маятник.

Пуля массы m, летящая со скоростью $\overline{v}$, попадает в покоящийся маятник массы M, застревает в нем и сообщает общей массе $M+m$ некоторую начальную скорость $\overline{V}$, в результате чего маятник с пулей отклоняется на расстояние S_0 (Рис. 1).

Для проведения измерений с баллистическим маятником необходимо, чтобы закон сохранения количества движения мог быть выражен в следующем виде:

$$m\overline{v} = (M + m)\overline{V} \tag{1}$$

то есть необходимо, чтобы вектор количества движения маятника с пулей сразу после удара был в точности равен по модулю и по направлению вектору количества движения пули непосредственно до удара.

Как известно, закон сохранения количества движения справедлив только для замкнутой системы тел, для которой сумма внешних сил равна нулю. Для системы маятник-пуля внешними силами являются сила тяжести, сила натяжения нитей, а также мгновенная ударная сила, возникающая в общем случае в точке подвеса маятника во время удара. Силой сопротивления воздуха пренебрегаем. Во время удара и после него эта система становится незамкнутой, так как внешние силы, действующие на маятник с пулей, не скомпенсированы и сумма их не равна нулю.

Выполнение во время удара закона количества движения в виде равенства (1) обеспечивается выполнением следующих условий:

1. Вектор скорости пули в момент удара должен быть направлен по прямой, проходящей через центр тяжести маятника (точнее, через центр качания маятника, который для математического маятника совпадает с центром тяжести). При невыполнении этого условия часть импульса ударной силы $\int_0^\tau \overline{F}dt = m\overline{v}$ будет передаваться точке подвеса маятника.
2. Вектор $\overline{v}$ должен быть направлен перпендикулярно плоскости, в которой лежат ось качания AA' и точка центра тяжести покоящегося маятника, то есть в направлении оси x. В противном случае маятнику будет сообщаться вращательное движение относительно других осей, помимо оси AA'.
3. Продолжительность импульса $\int_0^\tau \overline{F}dt$ должна быть настолько малой, чтобы маятник к концу удара не успевал существенно отклониться от положения равновесия.

Практически 3-е условие обеспечивается выбором достаточно длинной нити подвеса маятника и высокой вязкостью вещества в маятнике.

При выполнении перечисленных условий скорость пули находится из равенства (1):

$$v = \frac{M + m}{m} \cdot V \tag{2}$$

Полагая после удара систему маятник-пуля-Земля консервативной, то есть пренебрегая рассеянием энергии, применим к ней закон сохранения механической энергии.

При максимальном отклонении маятника скорость V обратится в нуль и кинетическая энергия маятника полностью перейдет в его потенциальную энергию, то есть

$$\frac{(M+m)V^2}{2} = (M+m)gh \tag{3}$$

Тогда

$$V = \sqrt{2gh} \tag{4}$$

где h — наибольшая высота подъема центра тяжести маятника с пулей, g — ускорение свободного падения.

Поскольку выполняется равенство (Рис. 1)

$$h = l - l\cos\alpha = 2l\sin^2\frac{\alpha}{2} \tag{5}$$

(α — максимальный угол отклонения, l — расстояние от оси вращения до центра тяжести маятника), и учитывая, что ввиду малости угла α можно положить

$$\sin\alpha = \frac{S_0}{l} \simeq \alpha \simeq 2\sin\frac{\alpha}{2} \tag{6}$$

то для скорости маятника имеем выражение

$$V = 2\sqrt{gl}\sin\frac{\alpha}{2} = S_0\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{7}$$

Подставив значение скорости V в формулу (2), получим:

$$v = \frac{M+m}{m}S_0\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{8}$$

Обычно масса мишени во много раз превышает массу пули, то есть выполняется неравенство $M \gg m$, и, следовательно, рабочая формула примет следующий вид:

$$v = \frac{M+m}{m}S_0\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{9}$$

Теоретические замечания:

1. Найдем долю кинетической энергии пули x, переходящей в кинетическую энергию системы маятник-пуля.

По закону сохранения и превращения энергии при абсолютно неупругом ударе пули о маятник имеем

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{(M+m)V^2}{2} + Q \tag{10}$$

где Q — часть кинетической энергии пули, перешедшая в теплоту. Тогда с учетом соотношения (2) на основании (10) получаем

$$x = \frac{\frac{(M+m)V^2}{2}}{\frac{mv^2}{2}} = \frac{m}{M+m} \tag{11}$$

Поскольку $M \gg m$, то лишь очень незначительная часть кинетической энергии пули переходит в кинетическую энергию маятника с пулей.

2. При абсолютно упругом ударе пули о маятник кинетическая энергия пули не переходит в теплоту и кинетическая энергия системы маятник-пуля остается постоянной; количество движения, приобретаемое маятником при таком ударе, выражается

$$MV' = m(2v - V') \tag{12}$$

откуда

$$v = \frac{1}{2}\frac{M+m}{m}V' \tag{13}$$

где V' — начальная скорость маятника после его абсолютно упругого удара с пулей. Следовательно, при абсолютно упругом ударе скорость маятника V' и баллистический отброс ${S_0}'$ в два раза больше, чем при абсолютно неупругом ударе. В этом случае выражение для скорости пули примет вид

$$v = \frac{M+m}{m}\frac{{S_0}'}{2}\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{14}$$

3. Соотношение (7) для начальной скорости маятника V в момент удара можно получить, не используя непосредственно закона сохранения механической энергии.

Поскольку продолжительность удара очень мала, то после удара при малом угле отклонения маятник продолжит свое движение по гармоническому закону

$$S = S_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \tag{15}$$

где S_0 — амплитуда колебания,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \tag{16}$$

— период колебания.

Мгновенное и максимальное значения скорости маятника соответственно запишутся следующими соотношениями:

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{2\pi}{T} S_0 \cos \frac{2\pi}{T} t; \tag{17}$$

$$V_0 = \frac{2\pi}{T} S_0 = S_0\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{18}$$

Очевидно, что при выполнении равенства (1) начальная скорость маятника

$$V = \frac{\int_0^\tau F dt}{M + m} \tag{19}$$

будет практически равна максимальной скорости V_0, с которой маятник должен проходить положение равновесия при гармоническом движении, то есть будет выполняться совпадающее с соотношением (7) приближенное равенство

$$\frac{\int_0^\tau F dt}{M + m} \simeq S_0\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{20}$$

или

$$\int_0^\tau F dt \simeq M' S_0\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{21}$$

где $M' = M + m$.

Из равенства (21) видим, что импульс силы действует на маятник по линейному закону. Это свойство метода измерения очень ценно на практике.

Выполнение соотношения, подобного выражению (21), при воздействии импульса силы на покоящийся маятник лежит в основе баллистического метода измерения.

3 Описание установки

В нашем случае баллистический маятник представляет собой систему из двух вложенных друг в друга сравнительно тяжелых полых цилиндров. Внешний цилиндр подвешен на четырех длинных нитях, закрепленных на кронштейне под потолком. Длина каждой нити регулируется. Полость внутреннего цилиндра до половины заполнена щетиной, в которой и застревает пуля после выстрела. Горизонтальное смещение маятника измеряется по шкале с помощью визира, закрепленного на нижней части внешнего цилиндра.

4 Порядок выполнения работы

1. Измерить на весах массы пуль и съемного внутреннего цилиндра маятника (массы внешнего цилиндра и длина нитей маятника указаны на установке).
2. Отрегулировать длину нитей так, чтобы геометрическая ось маятника была направлена горизонтально по направлению ствола пушки.
3. Установить шкалу параллельно оси маятника вблизи визира маятника.
4. Сжать пружину пушки и зафиксировать штифтом ее положение. Вставить пулю в дуло пушки и дослать ее шомполом до упора.
5. Поднятием штифта произвести выстрел и снять отсчет горизонтального смещения маятника по шкале.
6. С каждой пулей произвести не менее пяти выстрелов. Опыты проводить с тремя пулями различного веса.
7. По рабочей формуле (9) подсчитать скорость пули при каждом выстреле. Для каждой пули вычислить среднее значение скорости пули и среднюю абсолютную погрешность измерения. Данные наблюдений и расчетов занести в таблицу.
8. Окончательный результат для каждой пули записать в виде

$$v = \overline{v} \pm \overline{\Delta v}; \delta_v = \pm \frac{\overline{\Delta v}}{\overline{v}} \cdot 100\% \tag{22}$$

9. Подсчитать максимальную относительную погрешность метода измерений по формуле

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{1}{2}\frac{\Delta g}{g} + \frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S_0}{S_0} \tag{23}$$

где в качестве погрешностей измерений следует подставлять погрешности отсчитывания средств измерений.

Сравнить полученное значение со значением относительной погрешности результата измерения.

Рабочая формула:

$$v = \frac{M+m}{m} S_0 \sqrt{\frac{g}{l}} \tag{24}$$

где v - скорость пули, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, M - масса маятника, кг, m - масса пули, кг, S_0 - расстояние отклонения, м, g - ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, l - расстояние от оси вращения до центра тяжести маятника, м.

$g = 9.812 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$,

$m_1 = 0.00443$кг, $m_2 = 0.00719$кг, $m_3 = 0.00915$кг,

$$v = \overline{v} \pm \overline{\Delta v}; \delta_v = \pm \frac{\overline{\Delta v}}{\overline{v}} \cdot 100\% \tag{25}$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{1}{2}\frac{\Delta g}{g} + \frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S_0}{S_0} \tag{26}$$

5 Таблица 1:

6 Выводы

Вывод 1:

Провели экспериментальную проверку основного уравнения вращательного движения с использованием маятника Обербека. Измерили параметры движения груза, такие как время падения и масса груза, а также рассчитали моменты сил M_1 и M_2 двумя разными способами.

Рассчитанные моменты сил сравнили в пределах погрешности измерений для всех 5 случаев: $|M_1 - M_2| \leq |\Delta M_1| + |\Delta M_2|$. За значения M_1 и M_2 будем брать средние значения для каждого случая.

1. $|0.021 - 0.016| \leq |0.000659| + |0.000922|$

   $0.005 \leq 0.00158$. Неравенство не выполняется.

2. $|0.04 - 0.031| \leq |0.000892| + |0.001635|$

   $0.009 \leq 0.00253$. Неравенство не выполняется.

3. $|0.059 - 0.048| \leq |0.001129| + |0.002899|$

   $0.011 \leq 0.00403$. Неравенство не выполняется.

4. $|0.078 - 0.0645| \leq |0.001366| + |0.003897|$

   $0.0135 \leq 0.00526$. Неравенство не выполняется.

5. $|0.098 - 0.07825| \leq |0.001622| + |0.005139|$

   $0.0198 \leq 0.00676$. Неравенство не выполняется.

В результате выяснили, что расхождение между значениями M_1 и M_2 во всех случаях превышает суммарную абсолютную погрешность, что указывает на наличие ошибок или неточностей в измерениях.

Возможные причины расхождения:

1. Погрешности измерения времени t из-за неправильного изначального позиционирования груза относительно верхнего оптического датчика-концевика экспериментальной установки.
2. Неправильное положение нижней платформы установки, на которую приземляется груз, из-за чего он приземлялся на её край, что могли привести к неправильному срабатыванию нижнего датчика-концевика.
3. Незначительные изменения условий эксперимента (например, трение вала или неидеальная намотка нити).
4. Ошибки при вычислении погрешностей, особенно ΔM_1, которая оказалась слишком малой.

Для повышения точности измерений можно попробовать более аккуратно наматывать нить на вал, выровнять нижнюю платформу установки, располагать груз на большем расстоянии над верхним концевиком и проводить большее количество экспериментов для усреднения данных.

Вывод 2:

В ходе эксперимента было установлено, что угловое ускорение маятника Обербека действительно зависит от момента силы и массы груза. Полученные значения моментов сил M_1 и M_2 близки к теоретическим, однако их расхождение превышает допустимую погрешность.

Основными факторами, которые могли привести к подобным расхождениям, являются:

1) Трение вала установки. Во время проведения эксперимента было установлено, что рабочая установка достаточно устаревшая, что могло привести к увеличению силы трения.

2) Неточности в замерах времени самой установкой, так как секундомер был встроенным.

3) Сопротивление воздуха. Размер стержней и грузиков на подвижной крестовине мог повысить сопротивление воздуха, которое не учитывается при выводе рабочей формулы, как и другие факторы вне физической системы.

Несмотря на отклонение значений погрешностей от нормы, очевидно наблюдается зависимость времени падения грузика от его массы, и влияние этих величин на полученные моменты сил - с увеличением массы, увеличивается момент силы и уменьшается время падения грузика, что подтверждает справедливость основного уравнения вращательного движения.