Работа 1.2.1. 28.10.21

1. Аннотация

Цель работы: определить скорость полёта пули, применяя законы сохранения и используя баллистические маятники.

2. Теоретические сведения

Скорость вылета пули из духового ружья $150-200 \frac{м}{с}$, из боевой винтовки $\sim 1000 \frac{м}{с}$. Эти скорости много больше скоростей пешехода или автомобиля. Поскольку размер лабораторной установки составляет порядка нескольких метров, время пролёта пули составляет величину порядка $10^{-2} - 10^{-3}$ с. Для измерения таких величин необходима дорогостоящая аппаратура, регистрирующая быстропеременные процессы. Дешевле определить скорость пули по импульсу, передаваемому ею некоторому телу при неупругом соударении. В отсутствие внешних сил, а при кратковременном ударе даже при действии внешних сил, импульс системы пуля - тело сохраняется. Если масса тела значительно больше массы пули, то скорость тела с застрявшей в ней пулей будет значительно меньше скорости пули, и её легче измерить. Длительность неупругого соударения пули и тела, измеренная с момента их соприкосновения до прекращения относительного движения, зависит от сопротивления, которое испытывает пуля при движении внутри тела. Оценить её можно по глубине проникновения пули в тело, предполагая силу сопр. постоянной

Для измерения переданного пулей импульса и, следовательно, её скорости, используют баллистический маятник. Баллистическим называется маятник, колебания которого возбуждаются кратковременным начальным импульсом. Кратковременным можно считать импульс, если время действия сил (время удара) значительно меньше периода колебаний маятника. При этом отклонение маятника за время соударения значительно меньше амплитуды колебаний – максимального отклонения маятника. В случае гармонических колебаний время соуд. τ, отнесённое к периоду колебаний T, и отклонение $\Delta\varphi$ за время соуд, отнесённое к максимальному отклонению φ_m (амплитуде), связаны простым соотношением:

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi_m} \approx \frac{2\pi\tau}{T}.$$

Связь между макс. отклонением маятника и начальной скоростью, полученной им в результате толчка, описывается з. сохранения мех энергии, если потери энергии за период значительно меньше энергии его колебаний. По начальному отклонению маятника определяется импульс и скорость пули.

3. Методика измерений.

I. Метод баллистического маятника, совершающего поступательное движение.

Используемый баллистический маятник представляет собой тяжёлый цилиндр, подвешенный на четырёх нитях одинак длины. Он изображён на рис. 1 вместе с измерительной шкалой.

При соударении пули с цилиндром З.С.И. имеет вид

$$mu = (M+m)V,$$

где m – масса пули, M – масса цилиндра, u – скорость пули перед ударом, V – скорость цилиндра и пули после неупругого соударения..

Учитывая, что $M >> m$, можно записать

$$u = \frac{M}{m} V.$$

Тогда, по З.С.Э. высота h подъёма маятника над его нач. положением связана с нач скоростью маятника V:

$$V^2 = 2gh,$$

где g – ускорение свобод. падения.

Высота подъёма маятника выражается через угол φ отклонения маятника от вертикали:

$$h = L(1-\cos\varphi) = 2L\sin^2\frac{\varphi}{2}, \text{ где } \varphi \approx \frac{\Delta x}{L}.$$

Получаем:

$$\boxed{u = \frac{M}{m}\sqrt{\frac{g}{L}}\,\Delta x}.$$

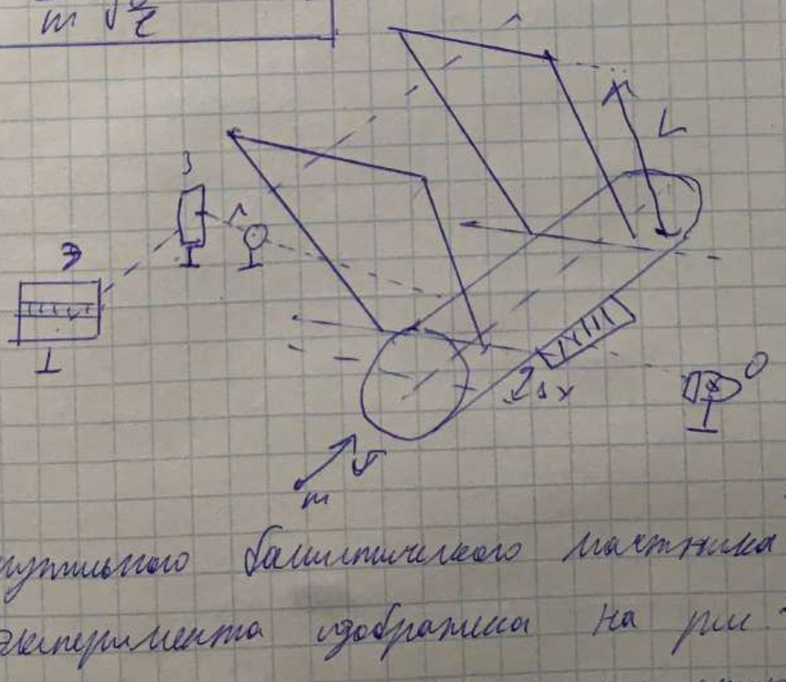

рис. 1.

II. Метод крутильного баллистического маятника.

Схема эксперимента изображена на рис. 2. Пуля массой m попадает в мишень, укреплённую на стержне a, который вместе с грузами M и проволокой Π образует крутильный маятник

Считая удар пули о мишень неупругим, для определения скорости u полёта пули непосредственно перед ударом воспользуемся законом сохр. момента импульса в виде

$$mur = J\Omega,$$

где r - расст. от линии полёта пули до оси вращения маятника (до проволоки M), J - момент инерции маятника, Ω - его угловая скорость непосредственно после удара. Пренебрегая потерями, закон сохранения энергии при колебаниях записываем в виде:

$$\frac{k\varphi^2}{2} = J\frac{\Omega^2}{2},$$

где k - модуль кручения проволоки M, а φ - макс. угол поворота маятника.

Получаем:

$$u = \varphi \frac{\sqrt{kJ}}{mr} \quad (1), \quad \varphi \approx \frac{x}{2d},$$

где d - расст. от шкалы Ш до оси вращения маятника

В формулу (1) входит произвед. kJ, которое можно найти по измерениям периодов колебаний маятника с грузами M и без них. В первом случае период колеб. равен:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}$$

Во втором:

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J-2MR^2}{k}}$$

Получаем:

$$\sqrt{kJ} = \frac{4\pi M R^2 T_1}{T_1^2 - T_2^2},$$

где R - расст. от центров масс грузов M до проволоки.

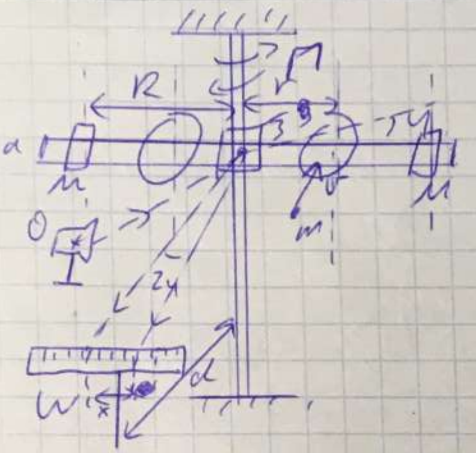

рис 2.

4. Используемое оборудование.

1. Духовое ружьё на штативе.
2. Осветитель.
3. Оптическая система для измерения отклонения маятника. $\sigma_{шт} = 0{,}25/2\ мм = 0{,}125\ мм.$
4. Измерительная линейка. $\sigma_{лин} = 1\ мм$
5. Пули.
6. Весы. $\sigma_{вес} = \pm 10 \cdot 10^{-3}\ г.$
7. Два баллистических маятника.

5. Результаты измерений и обработка данных.

I.

$L = 222{,}4 \pm 0{,}1$ см.

$M = 2405 \pm 5$ г.

$$u = \frac{M}{m}\sqrt{\frac{g}{L}}\,\Delta x.$$

$$\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{2L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{x}\right)^2}$$

№	m, г
1	0,51
2	0,5
3	0,5
4	0,498
5	0,509
6	0,508
7	0,507
8	0,514

№ пули	Δx, мм	u, м/с	σ_u, м/с
1	11,5	134,5	3,1
2	11,7	142,7	3,2
3	11,25	137,2	3,2
4	11,7	138,4	3,2

$v_{ср} = 138{,}9\ \frac{м}{с} \pm 3{,}2\ \frac{м}{с}$

№	$\sigma_{отн}$, %
1	1,4
2	3,8
3	1,7
4	0,5

Разброс связан с различием скоростей от выстрела к выстрелу.

II. $r = 23 \pm 0,05$ см. $M_1 = 729,9$ г $\sigma_x = 0,05$ м

$R = 34 \pm 0,05$ см. $M_2 = 729,6$ г. $\langle M_ф \rangle = 729,75$.

$d = 57 \pm 0,05$ см. $\sigma_T = 0,2$ с

	N	T_1,с	T_2,с	x,см	φ, рад	
см	5	20,125	–	16,3	0,143	0,0005
см	6	16,5	–	22,5	0,197	0,0005
0	7	–	15,3	21	0,184	0,0005
0	8	–	20,143	16,7	0,146	0,0005

$\langle T_1 \rangle = 18,71$ с, $\pm 0,2$ с

$\langle T_2 \rangle = 17,72$ с, $\pm 0,2$ с.

$$\sqrt{k\gamma} = \frac{4\pi M R^2 T_1}{T_1^2 - T_2^2} = 0,91 \ \frac{кг \cdot м^2}{с}.$$

$$\frac{\sigma_{\sqrt{k\gamma}}}{\sqrt{k\gamma}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma M}{M}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma T_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{(T_1^2-T_2^2)}}{T_1^2-T_2^2}\right)^2}$$

$$\sigma_φ = \sqrt{\left(\frac{\sigma x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma d}{d}\right)^2} \cdot φ.$$

$$\sigma_{(T_1^2 - T_2^2)} = \sqrt{2(\sigma T_1^2 + \sigma T_2^2)}.$$

$$u = φ \frac{\sqrt{k\gamma}}{mr}$$

$$\sigma_{\sqrt{k\gamma}} = 0,02 \ \frac{кг \cdot м^2}{с}$$

№	u, м/с	σ_u, м/с	$\sigma_{случ}$, м/с
5	111,1	3,3	19
6	153,4	4,6	23,3
7	143,5	4,3	13,4
8	112,3	3,3	17,8

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\sigma φ}{φ}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\sqrt{k\gamma}}}{\sqrt{k\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma r}{r}\right)^2} \cdot u$$

Разброс результатов связан с различными скоростей пули в разных опытах

$\langle u \rangle = (130,1 \pm 3,9 \ \frac{м}{с}$.

21.10

6. Обсуждение результатов и выводы.

I. Полученное значение средней скорости пули – $138,9 \pm 3,2 \ \frac{м}{с}$.

II. Полученное значение средней скорости пули – $130,1 \pm 3,9 \ \frac{м}{с}$. Полученные значения $\langle u \rangle$ имеют различия порядка погрешности.

Использованные в работе методы измерений позволяют достичь точности в 2%. Основной вклад в погрешность вносит различие скоростей пуль в разных опытах.

Таким образом, с помощью двух различных баллистических маятников я определил скорость пули, используя закон сохранения энергии.