

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

**Лабораторная работа по физической механике №9:
Изучение характеристик баллистической установки**

Выполнили студенты Б03-106:

Казусев Степан

Рогозин Владимир

Дюгаева Юлия

Кравец Кирилл

Герасимов Илья

Преподаватель: Кривец В.В.

Цель работы: изучить характеристики баллистической установки; получить и проанализировать зависимости скоростей снаряда от давления в камере при различных параметрах.

В работе используются: баллистическая установка.

1 Теоретическая часть

1.1 Баллистическая установка

Лабораторная баллистическая установка состоит из камеры высокого давления (ресивера), диафрагменного узла и ствола. Кроме того, она оборудована системами подачи и измерения высокого давления в ресивере и измерения скорости полета снаряда на срезе ствола. Камера высокого давления представляет собой толстостенный цилиндр объемом 500 см^3 , способный выдержать давление до 200 атм. Объем камеры сделан много больше ствола (30 см^3), чтобы можно было упростить газодинамический расчет (скорость внутри цилиндра можно считать нулевой).

Ствол и ресивер разделены диафрагмой, которая позволяет создать в ресивере контролируемое давление. В настоящей установке диафрагма разрывается под действием сил давления и поэтому максимальное давление, которое можно получить в ресивере, определяется ее прочностными характеристиками. Время раскрытия диафрагмы (10^{-4} с) много меньше времени разгона снаряда в стволе (10^{-2} с), и оказывает малое влияние на характер движения. Ствол установки, где разгоняется снаряд, изготовлен из калиброванной металлической трубки. Длина ствола выбирается из соображений необходимой скорости и технологии изготовления.

Напуск газа в ресивер осуществляется из баллона с помощью редуктора. Давление в момент разрыва диафрагмы фиксируется образцовым манометром. Разрыв диафрагмы осуществляется принудительно по достижению нужного давления посредством иглы, расположенной вдоль оси ресивера и приводимой в движение с помощью электромагнита. Варьирование диапазона давлений (от 2 до 40 атм.) возможно за счет изменения числа устанавливаемых диафрагм (до 5).

1.2 Оценка скорости движения снаряда

Приближенную оценку скорости движения снаряда можно сделать считая, что давление в ресивере не изменяется в процессе движения, а сила сопротивления не зависит от скорости и равна произведению атмосферного давления на площадь снаряда.

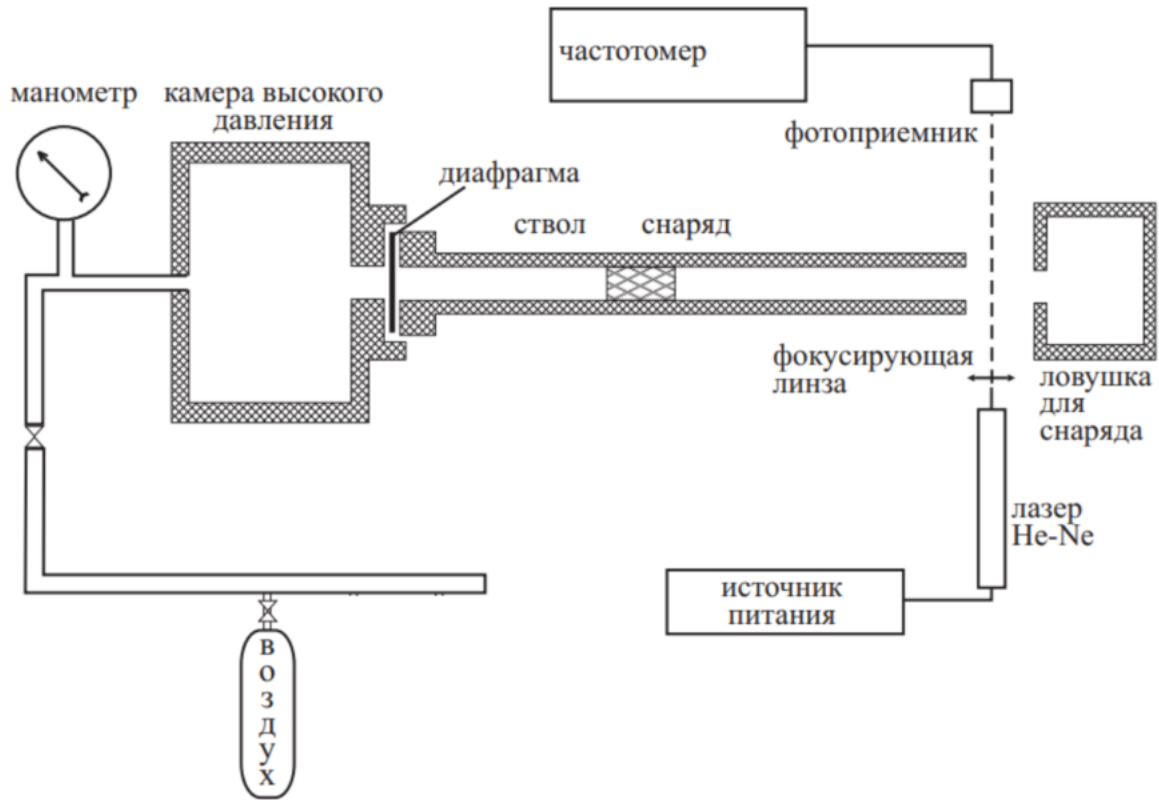


Рис. 1: Схема баллистической установки

$$u = \left[\frac{2SL}{m} (p_0 - p_1)^{1/2} \right], \quad (1)$$

где u - скорость снаряда, S - площадь поперечного сечения, L - длина ствола, m - масса снаряда, p_0 - давление газа в ресивере (КВД), p_1 - противодавление.

Учет сжимаемости газа приводит к следующим оценкам. При дозвуковых скоростях статическое давление в движущемся за снарядом газе (толкающем снаряд), можно записать:

$$p_{ст} = p_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{-\gamma/(\gamma-1)}, \quad (2)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ - отношение теплоемкостей, M - число Маха толкающего газа в стволе.

Используя известное соотношение энергии

$$\frac{2}{\gamma - 1} a^2 + u^2 = \frac{2}{\gamma - 1} a_0^2, \quad (3)$$

где a_0 - скорость звука в неподвижном газе, можно записать величину статического давления, которое действует на снаряд:

$$p_{ст} = p_0 \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u^2}{a_0^2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (4)$$

Противодавление, действующее на снаряд, можно записать как давление торможения воздуха, набегающего на неподвижный снаряд со скоростью снаряда.

$$p_{\text{пр}} = p_{\text{атм}} \left(1 + \frac{\gamma^* - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma^*/\gamma^* - 1}. \quad (5)$$

Таким образом, уравнение движения снаряда запишется:

$$m \frac{du}{dt} = S(p_{\text{ст}} - p_{\text{пр}}) \quad (6)$$

или

$$\frac{m}{p_0 S} \frac{du}{dt} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u^2}{a_0^2} \right)^{\gamma/\gamma - 1} - \frac{p_{\text{атм}}}{p_0} \left(1 + \frac{\gamma^* - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma^*/\gamma^* - 1}. \quad (7)$$

В общем случае p_0 - давление в ресивере, a_0 - скорость звука в неподвижном толкающем газе, γ, γ^* - показатели адиабаты толкающего и внешнего газа соответственно, a_0^* - скорость звука во внешнем газе (воздухе).

Если можно пренебречь атмосферным давлением, то есть выполняется $p_{\text{атм}}/p_0 \ll 1$, то уравнение выше запишется в виде

$$\frac{m}{p_0 S} u \frac{du}{dx} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u^2}{a_0^2} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (8)$$

и, разложив в ряд правую часть и учтя первый член разложения, что соответствует несжимаемой жидкости, получим

$$\frac{m}{p_0 S} u \frac{du}{dx} = 1 - \frac{\gamma}{2} \frac{u^2}{a_0^2}. \quad (9)$$

Это есть дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, решение которого имеет вид:

$$u = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-2g_0 \alpha^2 x)]^{1/2} \quad (10)$$

где $Sp_0/m = g_0$ - начальное ускорение, $\alpha^2 = \gamma/(2a_0^2)$.

В случае, когда противодавлением нельзя пренебречь, раскладывая правую часть уравнения **9** в ряд и учитывая только первые члены, получим

$$u(x) = \frac{(1 - \frac{p_{\text{атм}}}{p_0})^{1/2}}{a^*} (1 - \exp\{-2g_0 a^{*2} x\})^{1/2}, \quad (11)$$

где введено обозначение

$$a^{*2} = \frac{\gamma}{2a_0^2} + \frac{\gamma^*}{2a_0^{*2}} \frac{p_{\text{атм}}}{p_0}. \quad (12)$$

При одинаковых толкающем и окружающем газах имеем

$$u(x) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{p_0 - p_{\text{атм}}}{p_0 + p_{\text{атм}}} \right)^{1/2} \left(1 - \exp \left\{ -2g_0 \alpha^2 \left[1 + \frac{p_{\text{атм}}}{p_0} \right] x \right\} \right)^{1/2}. \quad (13)$$

2 Практическая часть

$$L_{\text{ствол}} = 50.8$$

пуля	m, г	h, mm	d, mm	S, mm^2
бол.	0.582	11.5	6.8	36.3
мал.	0.232	6.7	6.8	36.3

Таблица 1: Параметры пуль.

a_0 , м/с	α , с/м
338	0.0025

Таблица 2: Дополнительные параметры.

Здесь a_0 - скорость звука, g_0 - начальные ускорения для двух видов пуль. Расчёт был проведён по формуле 13.

γ для воздуха = 1,400.

Р, дел	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Р, атм	5.81	7.74	9.68	11.6	13.55	15.49	17.42	19.36	21.30	23.23
Δt мкс	69.6	56.4	51.0	45.6	42.6	42.2	37.6	37.0	34.2	33.6
U м/с	165.2	203.9	225.5	252.2	269.9	272.5	305.9	310.8	336.3	342.3

Таблица 3: Опыты с большим снарядом.

P , дел	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
P , атм	3.87	5.81	7.74	9.68	11.6	13.55	15.49	17.42	19.36	21.30	23.23
Δt мкс	25.4	21.0	19.9	18.4	16.5	15.4	14.3	12.5	11.3	12.0	13.0
U м/с	263.8	319.0	336.7	364.1	406.0	435.0	468.5	536.0	592.0	558.0	515.4

Таблица 4: Опыты с маленьким снарядом.

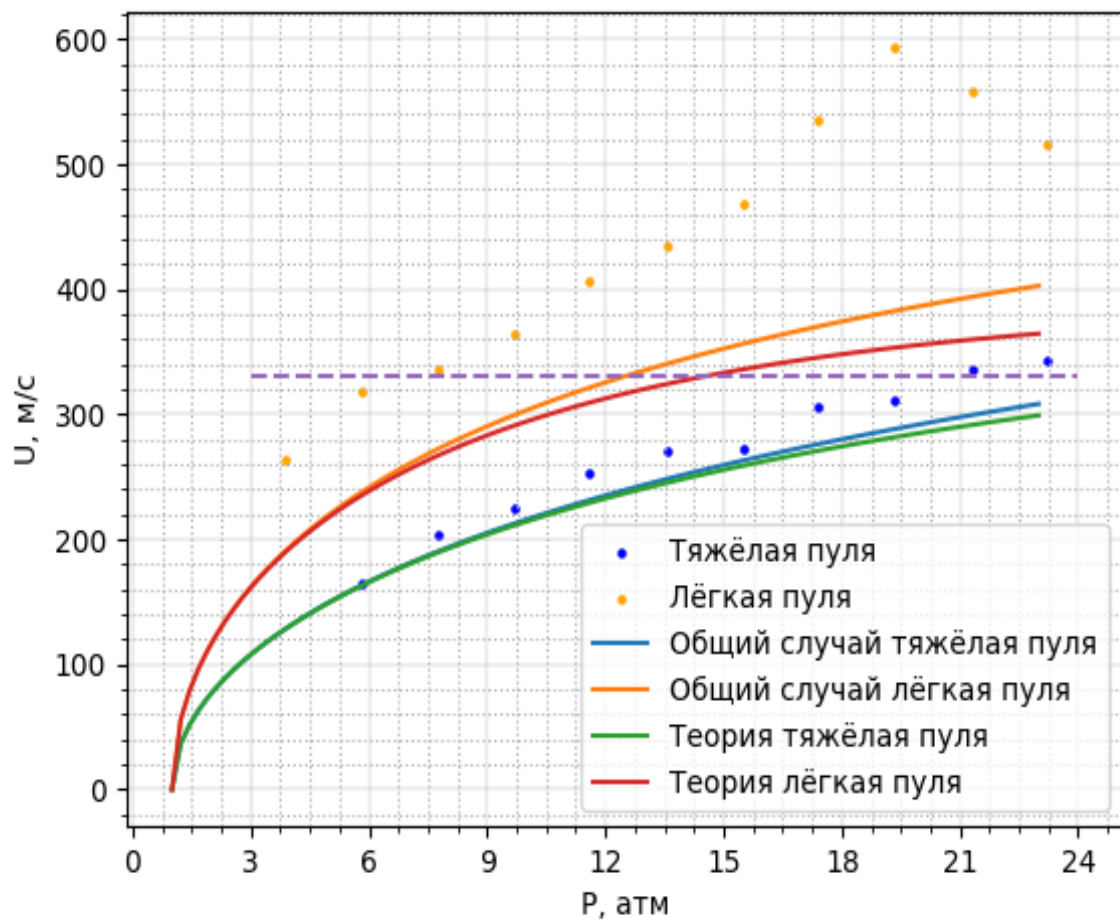


Рис. 2: Зависимость скорости снаряда от давления в ресивере

3 Вывод

1) Наблюдается различие между теоретической аппроксимацией и практическими значениями, так как в формуле никак не учитывается трение пули о внутреннюю поверхность ствола, из-за чего часть энергии уходит в тепло, а скорость уменьшается. 2) Из-за недостаточной герметичности трубок, присоединенных к ресиверу и соединяющих манометр, тоже могли возникнуть расхождения. Теория на малых скоростях для обеих пуль совпадает с теорией сжимаемого и несжимаемого

газа. На больших скоростях для маленькой пули теория не совпадает с теорией несжимаемого газа.