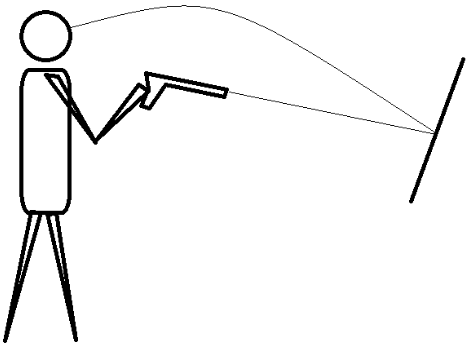
В тире и рядом

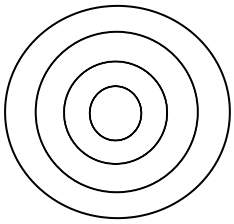
Шишка отскочила –
прямо Мишке в лоб…
Мишка рассердился…

На фотографии изображен участок поверхности толстого (10мм) листа фанеры с размерами примерно 15мм×15мм. В середине снимка ямка – след от удара свинцовой пульки массой 0,68г калибра 4,5мм, выпущенной из пневматического пистолета. Диаметр ямки ≈3мм меньше калибра пули, то есть она не застряла в фанере. Выстрел был произведен с малого расстояния ≈ 2м. Пуля была упруго отражена листом фанеры и попала стрелку прямо в лоб. Шишка на лбу не появилась, так как при ударе и отскоке пуля потеряла большую часть своей кинетической энергии.

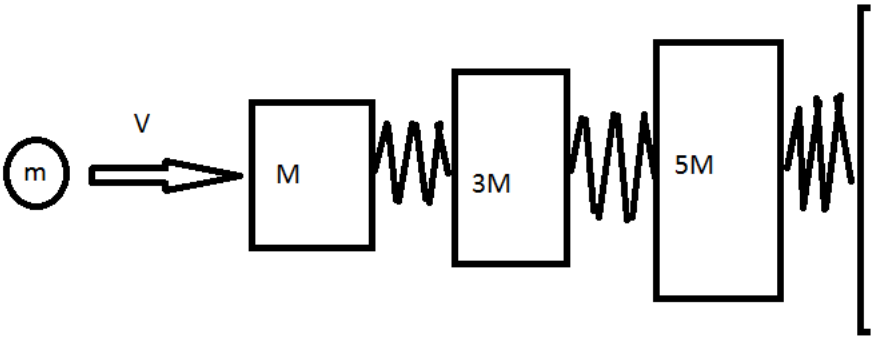


Первый вывод из случившегося: проводить такого рода эксперименты нужно, соблюдая правила техники безопасности. Стрелять нужно, находясь за прозрачной, например, стеклянной стенкой. Прозрачной – чтобы всё-таки можно было что-то видеть. Можно также в несколько раз увеличить расстояние от стрелка до мишени.

Измеренная методом баллистического маятника скорость пулек после вылета из ствола пистолета составляет около 100м/с. Пуля при вылете из ствола имеет кинетическую энергию примерно 3,4Дж. Как тратится начальная кинетическая энергия пули? На фотографии видна ямка – неупругая деформация фанеры – это разрушение материала, на которое требуется энергия. Фанера вокруг ямки была упруго деформирована и восстановила свою форму, при этом энергия упругой деформации превратилась в энергию звуковых волн и частично была возвращена пуле. Скорость распространения звуковых волн в фанере (в дереве) гораздо больше, чем начальная скорость пули. Поэтому размеры области фанеры, вовлеченной в удар, были во много раз больше размеров пули. Время удара можно оценить так: глубина ямки равна примерно 1 мм, на этом участке пути скорость пули уменьшилась со 100м/с до 0. Если, например, взять среднее арифметическое этих скоростей, то получится средняя скорость 50м/с, а это соответствует времени движения пули в фанере вперед 20мкс. Толщина фанерного листа 10мм. При скорости поперечных звуковых волн в сплошном дереве около 2км/с расстояние, пройденное звуковыми волнами за такое время в направлениях вдоль поверхности фанерного листа, составит примерно 4см, что в 4 раза превышает толщину слоя фанеры. Скорость продольных волн (в направлении полета пули) больше скорости поперечных волн примерно в два раза, поэтому продольные волны успевают несколько раз пробежать расстояние 10 мм, и можно считать, что в продольном направлении произошел «абсолютно неупругий удар». Размеры листа фанеры (20см×30см), в который попала пуля, были гораздо больше 4 см. Следовательно, когда пуля относительно фанеры перестала двигаться, волны по листу фанеры продолжили движение, и через некоторое время то место фанеры, куда попала пуля, вернулось к положению равновесия. Пуля не застряла в фанере, поэтому после прохождения положения равновесия (участком, в котором она находилась) пуля полетела в обратную сторону. Причем, её скорость оказалась равной скорости прохождения положения равновесия тем участком фанеры, в который пришелся удар. Разобьем мысленно лист фанеры на участки. Первый=цилиндр, с радиусом R. Второй = кольцо с внутренним радиусом R и внешним радиусом 2R, третий= кольцо с внутренним радиусом 2R и внешним радиусом 3R, и так далее.



Между этими участками имеется механическая связь, которую можно моделировать пружинками, распределенными по периметрам. С учетом такого разбиения эквивалентная механическая система, обладающая свойствами, похожими на свойства объектов, участвовавших в эксперименте, выглядит так, как показано на рисунке.



Масса первого груза, в который пуля ударяется абсолютно не упруго, равна 1×M, второго груза $M\times(2^2-1^2)=3\times M$, третьего груза $M\times(3^2-2^2)=5\times M$, четвертого – $M\times(4^2-3^2)=7\times M$, и так далее (последовательность нечетных чисел с множителем M). Жесткости пружин, соединяющих грузы, пропорциональны длинам участков контакта соответствующих грузов, то есть первая пружина имеет жесткость $K_1\sim2\pi R$, вторая – $K_2\sim4\pi R$, третья – $K_3\sim6\pi R$, четвертая – $K_4\sim8\pi R$, и так далее (последовательность четных чисел с одинаковым множителем).

Для упрощения анализа достаточно рассмотреть только два первых груза M и 3M с пружиной между ними. Скорость первого груза после попадания в него пули (при абсолютно неупругом соударении) равна $Vm/(m+M)\approx Vm/M$, так как масса пули m существенно меньше массы M. После взаимодействия со вторым грузом (3M) скорость первого груза равна $(Vm/M)\times(M-3M)/(M+3M) = -Vm/(2M)$. Вот с этой скоростью и отскакивает от системы больших грузов пуля массы m. Точный расчет дает поправочный коэффициент немного больший единицы.

Поскольку после отскока пуля имела скорость около 5м/с (что было найдено в последующих и уже безопасных для стрелка экспериментах ☺), то отношение масс m/M может быть оценено величиной 1:10. При плотности фанеры 0,8г/см^3 диаметр круга на листе фанеры, который «составил» первый груз с массой M, равен примерно: 3,3см. Диаметр (внешний) кольца, «составляющего» второй груз равен 6,6 см. Это значение по порядку величины соответствует полученной раньше оценке для размеров области, занятой волнами – 2×4 см = 8см.

Итак, при неупругом ударе пули о лист фанеры на разрушение материала фанеры (на образование той самой ямки, которая видна на фотографии) было потрачено ≈ 90% энергии, ≈ 9% в виде кинетической энергии достались фанере и ≈ 1% пуле. После того, как завершился контакт пули с фанерой, у пули осталась кинетическая энергия, составляющая только 0,25% от её первоначальной величины.

Эксперименты с пневматическим пистолетом были, естественно, продолжены.

Выяснялось, сколько слоев упаковочного картона пробивает пуля. Оказалось, что новая пуля пробивает в среднем 6-7 слоев картона, а пуля, которую использовали второй или третий раз (после пробивания стопки листов картона), проходила через 12-15 слоев картона. Это связано с тем, что все неровности и шероховатости на поверхности пули, которые обеспечивали большое сопротивление при первом использовании пули, после прохождения через несколько слоев картона стирались, сглаживались, и при повторных выстрелах пуля тратила меньше энергии на пробивание одного листа картона.

Пули направлялись в пластиковые бутылки от газированных напитков, заполненных водой. Пуля могла пробить только первую стенку бутылки, а вторая стенка всегда оставалась целой. То есть у пули после пробивания первой стенки кинетическая энергия уменьшается настолько, что на пробой второй стенки ее уже не хватает. А если стрелять в пустую бутылку, то в большинстве случаев стенка бутылки не пробивалась. Вот хорошая тема для подробного исследования какому-нибудь школьнику/исследователю – почему стенка бутылки с водой пробивается, а без воды нет?

Впечатляющее зрелище получается, когда пуля пробивает стенки жестяной банки с газированным пенным напитком. Сначала банка подвешивается на прочной нитке к ветке дерева. Нитка начинает раскручиваться, и когда банка приобретает максимальную угловую скорость, производится выстрел в нижнюю часть банки. Банка продолжает вращаться, а из двух образовавшихся в стенках отверстий начинают бить две пенные струи!

В других экспериментах пули выпускались в воду, причем выстрелы производились в направлении, составлявшем небольшой угол с горизонтом. Прямыми наблюдениями (зрителей вокруг на берегу собиралось много) было установлено, что пули «пробивают», двигаясь почти горизонтально по прямой, слой воды толщиной примерно 2м, и только затем уходят в глубину.

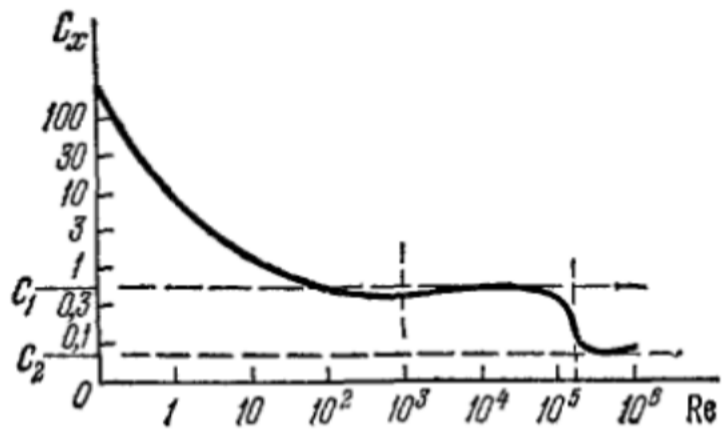
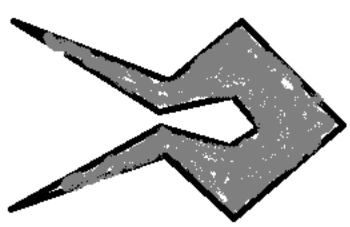


Рис 309.

Известно, то при движении тела с большой скоростью V в среде с плотностью ρ сила сопротивления пропорциональна динамическому давлению $\rho V^2/2$, площади поперечного сечения S, а коэффициент пропорциональности C_x зависит от числа Рейнольдса $\rho VR/\eta$, где R – это характерный размер тела $R \approx S^{0,5}$, а η – это вязкость материала среды (вязкость воды равна ~10^{-3} Пуаз). Например, в диапазоне чисел Рейнольдса от 10^2 до 10^5 для тела в форме шарика этот коэффициент равен примерно 0,4. При числах Рейнольдса от 2×10^5 до 10^6 этот коэффициент принимает значение около 0,1, то есть имеет место существенное уменьшение относительных потерь кинетической энергии тела в диапазоне от 10^5 до 2×10^5. При числах Рейнольдса больших 10^6 этот коэффициент увеличивается.

На рисунке из учебника С.П. Стрелкова «Механика» показана графически зависимость C_x от Re для шарика.



Форма пули вовсе не шарик. На рисунке она показана в сечении. Понятно, для чего у свинцовой пули такая хвостовая часть – за счет деформации относительно мягкого свинца обеспечивается отсутствие зазора между пулей и стенками ствола, в котором пуля разгоняется сжатым воздухом, а также обеспечивается зацепление пули за так называемые «нити нарезки» в стволе. Ствол имеет винтовую нарезку, что придает движущейся вдоль ствола пуле вращательное движение вокруг ее оси симметрии. При таком движении (поступательное + вращательное) пуля в воздухе сохраняет стабильное положение по

отношению к направлению выстрела и этим обеспечивается большая дальность и точность стрельбы.
Коэффициент C_x для пуль описанной формы явно больше соответствующего коэффициента для шарика с таким же максимальным сечением.
В начале полета пули в воде число Рейнольдса составляет примерно $4{,}5\times10^5$. После того, как пуля потеряет 80% кинетической энергии (скорость её уменьшится до 45 м/с), число Рейнольдса составит 2×10^5. Это означает, что большую часть пути в воде пуля движется при относительно малых потерях энергии. Только потеряв 96% энергии (скорость уменьшилась до 20м/с), пуля начинает испытывать сопротивление с коэффициентом ≈ в 4 раза большим, чем при начальной скорости. Можно считать, что движение вниз (падение) пули начинается с момента, когда сила сопротивления сравняется по величине с силой тяжести (Архимедовой силой в связи с её относительной малостью можно пренебречь). Это соответствует скорости пули в воде ~1м/с. При этом число Рейнольдса равно примерно 7×10^3.
Из 2-го закона Ньютона получается уравнение движения пули в горизонтальном направлении (в пренебрежении силой тяжести). При умножении выражений с двух сторон от знака равенства на Vdt можно получить уравнение:

$$Md\left(\frac{V^2}{2}\right) = -C_x\rho\left(\frac{V^2}{2}\right)SVdt = -C_x\left(\frac{V^2}{2}\right)dm$$

$$\rho SVdt = dm$$

Здесь dm – это масса воды, которую пуля «замела» своим сечением при проходе через воду.
Решение этого уравнения:

$$\frac{d\left(\frac{V^2}{2}\right)}{\left(\frac{V^2}{2}\right)} = -C_x\frac{dm}{M}$$

$$\ln\left[\frac{V_к^2}{V_н^2}\right] = -C_x\frac{m}{M} = -C_x\frac{L\rho S}{M}$$

Здесь L – это путь, пройденный пулей в воде. Если считать, что от скорости пули 100м/с вплоть до скорости 1м/с коэффициент C_x остается одним и тем же, то его значение найдётся из соотношения:

$$2\ln\left(\frac{100}{1}\right) = C_x\times\frac{2\times10^3\times\pi\times(0{,}00225)^2}{6{,}8\times10^{-4}}$$

$$C_x = 0{,}197 \approx 0{,}2$$

Полученное значение C_x для пули примерно в 2 раза больше, чем для шарика с таким же максимальным сечением. Отметим, что даже начальная скорость пули в 15 раз меньше скорости звука в воде, а также то обстоятельство, что вода обладает малой сжимаемостью. При максимальном динамическом давлении, создаваемом пулей $\rho V^2/2$=50атм, плотность воды перед пулей увеличивается только на 0,05%.

При выстреле из пневматического пистолета в воздух в вертикальном направлении (от уровня земли) новая свинцовая пулька падает на землю в среднем через 9,4 секунды. Стреляная свинцовая пулька падает в среднем через 10 секунд (первые выстрелы такими пулями производились в стопку картонных листов).

Эксперименты со стрельбой в вертикальном направлении проводились возле бассейна достаточно больших размеров (конечно, стрельба велась, когда в бассейне никого не было ☺). С момента выстрела до момента появления всплеска на поверхности воды (на расстоянии 2-5 м от места выстрела) проходили в среднем эти самые секунды. Начальная скорость свинцовой пули 100м/с. При такой скорости движения пули в воздухе с плотностью ρ=1,3кг/м^3 и вязкостью $\eta \approx 2 \times 10^{-5}$ число Рейнольдса равно примерно: $1{,}3 \times 10^4$, то есть коэффициент C_x в формуле для силы сопротивления находится на участке зависимости от числа Рейнольдса, когда он примерно постоянен. Шарику на аналогичном участке соответствует значение коэффициента ≈ 0,4. Для пули этот коэффициент, наверняка, будет больше. Придется подбирать такое значение этого коэффициента, чтобы рассчитанное время полета пули соответствовало экспериментально полученному значению.

Проще всего это сделать не аналитически, а с помощью компьютера. Подобранные коэффициенты для полета новых и стреляных пуль в воздухе получились:

Стреляные – 10,0с – C_x =0,72. Высота подъема – 120м.

Новые – 9,4с – C_x =0,88. Высота подъема – 105м.

Отметим, что и в этих случаях коэффициент C_x для данного диапазона чисел Рейнольдса больше, чем для круглого шарика с таким же максимальным сечением. Максимальная скорость пули примерно в 3 раза меньше скорости звука в воздухе, а динамическое давление, создаваемое пулей $\rho V^2/2$=0,06 атм, и увеличивает плотность воздуха перед пулей примерно на 6%.

Естественно, что выстрелы производились и под значительными углами к горизонту. Экспериментально подбирался, например, такой угол, чтобы дальность полета по горизонтали была максимальной. В этом случае пули выпускались над поверхностью медленно текущей реки в безветренную погоду. Всплески при падении пуль в воду были видны на большом расстоянии. «На глаз» это расстояние было порядка 150 м, и достигалась такая дальность стрельбы при наклоне ствола пистолета к горизонту около 30º. С помощью компьютера можно найти максимальную дальность полета пули в горизонтальном направлении и угол к горизонту, под которым нужно стрелять, чтобы дальность была максимальной. При этом использовалось значение C_x =0,72. Результаты расчета: Угол ≈ 32,3º, максимальная дальность ≈168м.

Выстрелы в горизонтальном направлении над поверхностью воды с высоты около 2м над водой приводили к тому, что пуля в первый раз падала на середине реки (примерно в 50 м от берега), и несколько раз отскакивала от поверхности воды, создавая несколько всплесков.

Это напоминало прыжки на воде плоских камешков, которые все мы в детстве бросали в воду с берега.

«Мораль» = любая механическая игрушка может послужить экспериментальным оборудованием для многочисленных физических экспериментов.

С. Варламов