

Физика 9–11

Публикуемая ниже заметка «Не стреляйте в белых лебедей» предназначена девятиклассникам, заметка «Хаос молекул и звезд» — десятиклассникам, «Зачем быть конденсатору в магнитном поле?» — одиннадцатиклассникам.

Не стреляйте в белых лебедей

А. СТАСЕНКО

ИЗВЕСТНО, что на тело, движущееся в воздухе, действует сила сопротивления \vec{F} . Почти очевидно, что эта сила зависит от скорости движения \vec{v} и размеров тела, например площади поперечного сечения S , причем эта зависимость типа «чем больше v и S , тем больше F ». Можно еще уточнить вид этой зависимости, исходя из соображений размерностей (единиц измерения). Действительно, сила измеряется в ньютонах ($[F] = \text{Н}$), а $\text{Н} = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$. Видно, что секунда в квадрате входит в знаменатель. Отсюда сразу ясно, что сила должна быть пропорциональна квадрату скорости тела ($[v^2] = \text{м}^2/\text{с}^2$) и плотности ($[\rho] = \text{кг}/\text{м}^3$) — конечно, той среды, в которой движется тело. Итак,

$$F \sim \rho S v^2.$$

А чтобы подчеркнуть, что эта сила направлена против вектора скорости, можно записать так:

$$\vec{F} \sim -\rho S v \vec{v}.$$

Мы узнали уже очень много, но это еще не все. Наверняка сила сопротивления (аэродинамическая сила) зависит и от формы тела — не случайно ведь летательные аппараты делаются «хорошо обтекаемыми». Чтобы учесть и эту предполагаемую зависимость, можно в полученное выше соотношение (пропорциональность) ввести безразмерный множитель, который не нарушит равенства размерностей в обеих частях этого соотношения, но превратит его в равенство:

$$\vec{F} = -\alpha \rho S v \vec{v}.$$

Представим себе шарик, движущийся в воздухе, — например дробинку, горизонтально вылетевшую с начальной скоростью \vec{v}_0 . Если бы не было

сопротивления воздуха (в школьных задачах обычно так и говорится: «сопротивлением воздуха пренебречь»), то на расстоянии x за время $t_0 = x/v_0$ дробинка сместилась бы по вертикали вниз на

$$y_0 = \frac{gt_0^2}{2} = \frac{g}{2} \left(\frac{x}{v_0} \right)^2. \quad (1)$$

Соответствующая кривая (парабола) изображена на рисунке 1 штриховой линией (заметим, что ось Y направлена вниз). Но из-за действия силы сопротивления (направленной против вектора скорости) время полета дробинки до вертикальной плоскости x будет больше t_0 . Следовательно, сила тяжести $m\vec{g}$ дольше будет действовать на дробинку, так что она опустится ниже y_0 .

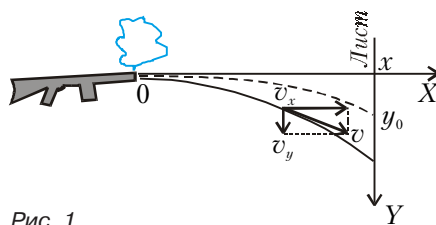


Рис. 1

И вообще, дробинка будет двигаться по другой кривой (сплошная линия на рисунке 1), уже не являющейся параболой (ее называют *баллистической траекторией*).

И тут наше успешное продвижение в познании силы сопротивления резко замедляется. Соображения размерности уже бесполезны: ведь α — безразмерный множитель. Чтобы узнать его для тела конкретной формы, нужны либо численные решения уравнений газодинамики (описывающих движение воздуха вокруг этого тела), либо экспериментальные исследования (есть наука, которая так и называется:

эксperimentalная аэрогазодинамика).

Что можно сказать об этой кривой? Если были бы известны начальная скорость дробинки v_0 и коэффициент α в силе сопротивления, то нужно было бы написать уравнение второго закона Ньютона и решить его. Это — дело математики, но кто даст математикам эти величины? Попробуем справиться сами.

Примем такой план действий:

1) Постараемся как можно подробнее (при наших скромных математических знаниях) описать движение дробинки для любых значений α и v_0 .

2) Экспериментально измерим вертикальные смещения дробинки, например, при помощи вертикального листа бумаги, помещенного на известном расстоянии x от ружья.

3) Сравнивая теорию и эксперимент, получим α и v_0 .

Итак, прежде всего запишем уравнение движения дробинки под действием силы тяжести $m\vec{g}$ и силы сопротивления воздуха \vec{F} , определенной выше:

$$m\vec{a} = m\vec{g} - \alpha \rho S v \vec{v}.$$

Разделим обе части этого уравнения на массу дробинки m . Очевидно, что тогда последнее слагаемое будет обратно пропорционально радиусу дробинки: действительно, площадь поперечного сечения шарика пропорциональна квадрату радиуса, а объем (и, значит, масса) — кубу радиуса. Если считать, что α не зависит от размеров шарика, то эту величину и плотность воздуха можно «спрятать» в новую постоянную β , так что получим

$$\vec{a} = \vec{g} - \frac{\beta}{r} v \vec{v}. \quad (2)$$

Заметим, что в отсутствие сопротивления (когда α и β равны нулю) траектории всех дробинко одинаковы и все они попадут в точку y_0 . А вот сопротивление воздуха как раз и позволяет «рассортировать» их по размерам. (Это же «сортирующее свойство» используется в сельском хозяйстве, на току, когда боковой ветер отделяет легкую шелуху от полновесных зерен.) Из уравнения (2) видно, что чем меньше дробинка, тем сильнее влияет на ее движение воздух (радиус входит в знаменатель). И наоборот, чем массивнее тело, тем с большей точностью можно пренебречь сопротивлением, так что останется только сила тяжести ($\vec{a}_0 = \vec{g}$). Только в этом предельном случае