

# Аэродинамический парадокс спутника

А. МИТРОФАНОВ

*Неожиданное случается в жизни чаще, чем ожидаемое.*

Тит Макций Плавт

*Парадоксы – вот единственная правда.*

Бернард Шоу

**П**ОПРОБУЕМ ответить на вопрос, может ли тело, двигаясь в среде и испытывая действие силы со стороны среды, увеличить свою скорость. На первый взгляд, такое событие кажется не более правдоподобным, чем известное предложение барона Мюнхгаузена тащить себя за волосы. Казалось бы, скорость тела в среде должна только уменьшаться, однако не торопитесь с выводами. Такие случаи вполне возможны и в той или иной степени наблюдаются при движении искусственных спутников и метеоритов вокруг планет в разреженной атмосфере. Речь идет об известном аэродинамическом парадоксе спутника – попадая в верхние слои атмосферы, космический аппарат, испытывая торможение в разреженном газе, увеличивает при этом скорость своего движения.

Прежде чем перейти к описанию происходящего на орбите, рассмотрим более простой пример из механики. Пусть небольшое тело закреплено на конце растяжимой упругой нити, пружины, резинового шнура или какого-то другого подвеса и движется с постоянной скоростью в плоскости по окружности. Будем считать, что для подвеса справедлив закон Гука, т.е. сила натяжения пропорциональна удлинению подвеса. Оказывается, если тело каким-либо образом начать тормозить, его движение изменится. В частности, если тело мгновенно остановить, а потом отпустить, то растянутый подвес сообщит телу некоторую скорость в направлении перпендикуляра к радиусу вращения. Максимальную скорость, которую приобретет тело, можно найти из закона сохранения энергии для системы тело – упругий подвес. В случае, когда растяже-

ние подвеса значительно превышает его начальную длину, максимальная конечная скорость тела будет почти равна начальной скорости вращения по окружности.

Наш пример – упрощенная аналогия задачи о торможении спутника в атмосфере: тело – это спутник, а упругий подвес – модель притяжения Земли. Конечно, эта аналогия грубая, так как закон Гука вовсе не описывает гравитационные силы, которые (как и кулоновские силы, действующие между зарядами) обратно пропорциональны квадрату расстояния между телами, а в нашем случае – квадрату радиуса орбиты. Движение спутника в верхних слоях атмосферы планеты происходит сложнее и интереснее, чем движение шарика на резиновом подвесе.

Для изучения эволюции орбиты спутника, движущегося в разреженном газе, нам потребуются некоторые формулы. Рассмотрим движение спутника массой  $m$  по круговой орбите радиусом  $R$  вокруг Земли, масса которой  $M$ . Для высоких орбит, когда притяжение Земли является основной силой, оказывающей влияние на движение спутника, его скорость определяется уравнением

$$v^2 = \frac{GM}{R}, \text{ или } v = v_0 \sqrt{\frac{R_0}{R}}, \quad (1)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $R_0$  – радиус Земли, равный примерно 6400 км, а  $v_0 = \sqrt{g_0 R_0}$  – первая космическая скорость спутника, равная 7,9 км/с для нашей планеты ( $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли).

Сила сопротивления, действующая со стороны разреженного газа на спут-

ник в верхних слоях атмосферы, определяется формулой

$$F_{\text{сопр}} = C_x \frac{\rho v^2}{2} S_x. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  – плотность атмосферы на орбите, которая сильно зависит от высоты полета спутника;  $S_x$  – площадь поперечного сечения спутника, точнее – площадь максимального сечения спутника плоскостью, перпендикулярной вектору скорости  $\vec{v}$  полета спутника относительно среды (или, как говорят, площадь миделя);  $C_x$  – так называемый коэффициент лобового сопротивления, зависящий, вообще говоря, от скорости, но для реальных условий полета спутника на большой высоте его можно считать примерно равным 2. Последнее просто означает, что соударения молекул и атомов с обшивкой спутника неупругие, в результате чего спутнику в единицу времени передается импульс, равный  $\rho v^2$  на единицу площади поперечного сечения. Напомним, что орбитальная скорость спутника во много раз превышает среднюю тепловую скорость молекул и атомов атмосферного газа. (Если бы было иначе, то, как нетрудно догадаться, Земля очень быстро потеряла бы свою атмосферу!) Поэтому собственное движение частиц среды в рассматриваемых примерах при расчетах сил торможения можно не учитывать.

К каким же следствиям приводит наличие разреженного газа (или, как говорят, атмосферного «хвоста») на орбите спутника? Для высоких орбит учет силы сопротивления среды можно рассматривать как малые возмущения, приводящие к небольшим изменениям параметров орбиты.