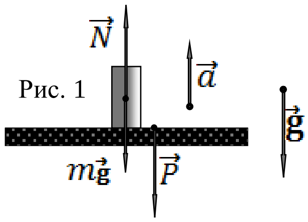
Задание 9-2. Земная невесомость.

Часть 1. «Идеальная невесомость»

1.1 Вес тела $\vec{P}$ – сила, с которой тело действует на опору или растягивает подвес. В отличие от силы тяжести, вес, приложенный к опоре или подвесу, зависит от состояния движения опоры или подвеса.

Рассмотрим (для определенности) брусок на горизонтальной поверхности (Рис. 1), которая может двигаться вверх или вниз с различными скоростями и ускорениями.

Рис. 1



При равномерном движении опоры в любом направлении вес $\vec{P}$ тела не изменится, поскольку эта система отсчета инерциальная (ИСО).

Если же опора будет иметь ускорение, направленное, например, вверх (см. Рис. 1), то вес тела увеличится (следует из второго закона Ньютона)

$$P_{\uparrow} = m(\mathbf{g} + a) \quad (1)$$

Заметим, что (1) никак не зависит от направления скорости – тело может двигаться как вверх, так и вниз, важно направление именно ускорения. Таким образом, при направлении ускорения лифта «вверх» получить состояние невесомости ($P = \mathbf{0}$) никак не получится.

При направлении ускорения лифта «вниз» ситуация меняется

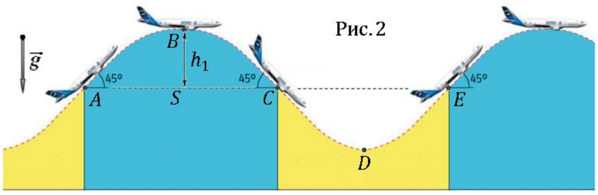
$$P_{\downarrow} = m(\mathbf{g} - a) \quad (2)$$

Следовательно, при движении лифта вниз с ускорением $a = \mathbf{g}$ будет наступать состояние невесомости

$$P_{\downarrow} = m(\mathbf{g} - \mathbf{g}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

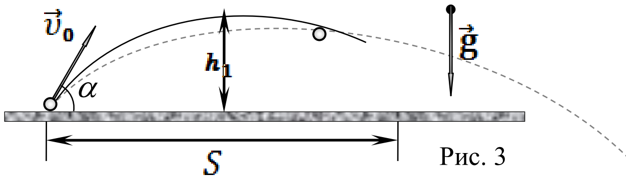
Как следует из (3) лифт может двигать в любом направлении (опускаться, ускоряясь или подниматься, замедляясь), но с ускорением $a_1 = \mathbf{g}$, направленным вниз. При этом его пассажиры испытают кратковременную невесомость. Простейший вариант – свободное падение на небольшом промежутке времени (не более нескольких секунд!).

1.2 Как следует из решения пункта **1.1** при движении тела с ускорением свободного падения $a_1 = \mathbf{g}$, оно находится в состоянии невесомости. Поскольку при движении в поле тяжести земли это условие выполнено, то приходим к выводу, что при движении по параболе (под действием одной силы тяжести $m\vec{\mathbf{g}}$) тело будет в состоянии невесомости.



1.3 Поскольку на участке ABC самолет выключает двигатели (Рис. 2) и переходит на параболическую траекторию, то его движение ничем не отличается от движения камешка, брошенного под углом к горизонту (Рис. 3).

Соответственно, для нахождения времени невесомости $t_н$ можно воспользоваться известной формулой для времени полёта тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0



$$t_п = \frac{2v_{0y}}{\mathbf{g}} = \frac{2v_0 \sin\alpha}{\mathbf{g}} = 26{,}0 \text{ с} \quad . \tag{4}$$

Хотя полученное значение $t_н$ и не очень большое, но это время «в десятки раз» превышает время «лифтовой невесомости».

1.4 В верхней точке траектории скорость самолёта v_1 будет равна проекции его начальной скорости на горизонтальное направление

$$v_1 = v_{0x} = v_0 \cos\alpha = 460\,\frac{км}{ч} = 128\,\frac{м}{с} \,. \tag{5}$$

Вычислим также радиус R кривизны параболы в верхней точке траектории, предполагая, что самолет движется по дуге окружности радиуса R с ускорением

$$. \tag{6}$$

1.5 Для вычисления высоты h_1 максимального подъёма (см. Рис. 3) самолёта над уровнем AC воспользуемся формулой для максимальной высоты подъёма тела, брошенного под углом к горизонту

$$h_1 = \frac{v_0^2(\sin\alpha)^2}{2\mathbf{g}} = 835 \text{ м} \quad . \tag{7}$$

1.6 Поскольку парабола CDE по условию симметрична параболе ABC , то её прогиб h_1 и радиус R кривизны такие же, как и в ранее рассмотренных пунктах.

Соответственно, в нижней точке D траектории (см. Рис. 2) по закону сохранения энергии скорость самолёта вырастет до значения

$$v_2 = \sqrt{v_0^2 + 2\mathbf{g}h_1} \quad . \tag{8}$$

Следовательно, центростремительное ускорение самолета будет направлено вверх и равно

$$a_2 = \frac{v_2^2}{R} = \frac{v_0^2 + 2gh_1}{v_1^2}\, g = 29{,}4\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 3{,}00\ g \quad , \tag{9}$$

где R – радиус (6) кривизны параболы в нижней точке траектории (такой же, как и в верхней точке).

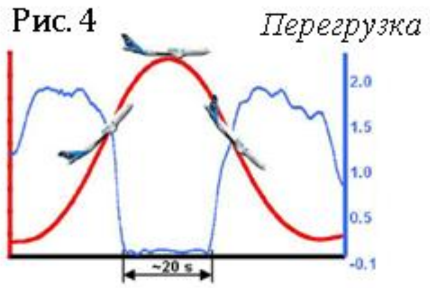
Таким образом, ответ в данном пункте принимает вид

$$\eta = \frac{a_2}{g} = 3{,}00 \quad . \tag{10}$$

Для справки на Рис. 4 приведены показания приборов, измеряющих перегрузку в реальной ситуации. Как видим из рисунка, показания самописцев в районе точки D дают для перегрузки значение

$$\eta = \frac{a_2}{g} = 2{,}00 \quad .$$

Таким образом, наша оценка представляется вполне адекватной и реальной.



Часть 2. «Реальная невесомость»

2.1 При учете силы сопротивления воздуха (т.е. в реальной ситуации) пилоты не выключают двигатели полностью, поскольку для возникновения невесомости необходимо силой тяги двигателей $F_т$ постоянно компенсировать действующую на самолёт силу сопротивления воздуха $F_с = -\beta v^2$.

Для этого (помимо высокого лётного мастерства!) необходима мгновенная мощность

$$P_д(t) = F_т \cdot v = F_с \cdot v = \beta v^3 \quad . \tag{11}$$

При движении по параболе скорость тела меняется (сначала уменьшается, а потом увеличивается) от времени по закону

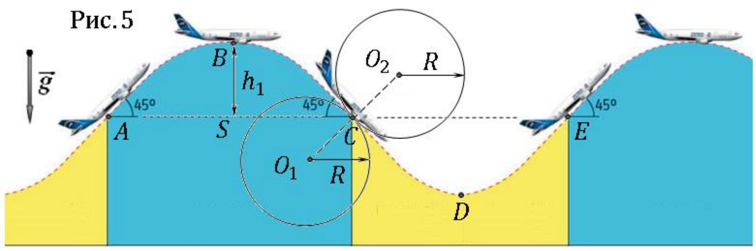
$$v(t) = \sqrt{v_{0x}^2 + (v_{0y} - gt)^2} \quad , \tag{12}$$

Соответственно, искомая мощность

$$P_д(t) = \beta\sqrt{v_{0x}^2 + \left(v_{0y} - gt\right)^2}^{\,3} = \beta\left(\sqrt{v_0^2 - 2v_0 \sin\alpha gt + g^2t^2}\right)^3 \quad . \tag{13}$$

Все необходимые вычисления следует проводить с учетом правила сохранения трёх значащих цифр (столько задано в условии).

2.2 При движении вблизи точки C происходит «смена» парабол и, соответственно, мгновенный перенос центров кривизны различных участков траекторий из точки O_1 в точку O_2 (Рис. 5). Это приводит к резкому изменению направления центростремительного ускорения на угол примерно в 180 градусов



(было направление CO_1, а «через мгновение» стало CO_2). Такое изменение действующих сил и ускорений изнутри самолёта воспринимается как действие больших сил инерции, что и «чувствуют» на себе пассажиры. Данное явление, правда, в меньших масштабах, можно наблюдать при двойном повороте трамвая или троллейбуса, если внимательно проследить за синхронными «качаниями голов» сидящих пассажиров.