

кратковременной невесомости

Условие

Задание 2. Земная невесомость.



Для создания «кратковременной невесомости» в земных условиях (например, для тренировки космонавтов) можно использовать богатые возможности современной науки и техники: от лифта до самолёта (Рис. 1). Рассмотрим некоторые из них.

Силой сопротивления воздуха в первой части данной задачи можно пренебречь. Ускорение свободного падения $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Часть 1. «Идеальная» невесомость.

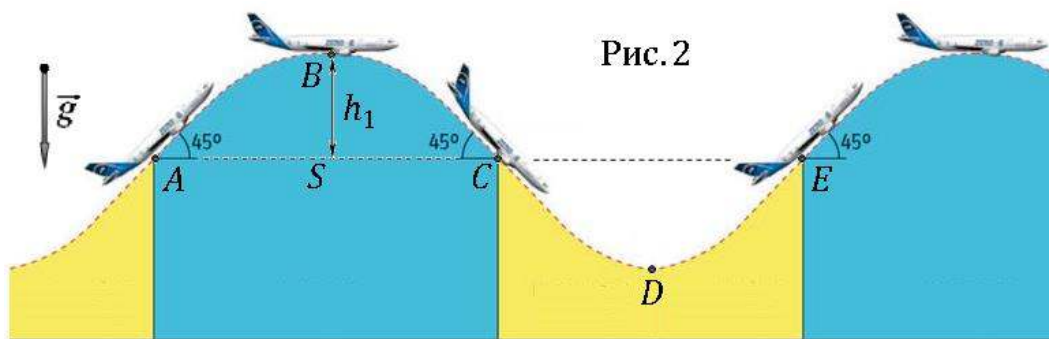
В этой части задачи будем считать, что сила сопротивления воздуха мала, и ей можно пренебречь.

Рассмотрим лифт, который может двигаться с любым ускорением a_1 по вертикальной шахте (как вверх, так и вниз!).

1.1 В каком направлении, и с каким ускорением a_1 необходимо двигать лифт, чтобы его пассажиры испытали кратковременную невесомость?

Для создания «кратковременной невесомости» при тренировках космонавтов в земных условиях используются полёты авиации по некоторой траектории с «приглушенными» двигателями.

1.2 Покажите, что эта траектория является параболой.



Пусть самолёт, находясь в точке A, и имея скорость $v_0 = 650 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, направленную под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту, «выключает» двигатели и переходит на параболическую траекторию ABC (см. Рис. 2).

1.3 Найдите промежуток времени t_n , в течение которого пассажиры (и экипаж!) будут испытывать невесомость.

1.4 Определите скорость v_1 самолёта в верхней точке B траектории (см. Рис. 2).

1.5 Вычислите максимальную высоту h_1 и дальность полёта $S = |AC|$ самолёта по горизонтали (см. Рис. 2). 1.6 В точке C траектории пилоты переводят машину на «симметричную» параболу CDE (см. Рис. 2), ветви которой направлены вверх. Чему равна перегрузка $\eta = \frac{a_2}{g}$ пассажиров в нижней точке D траектории, где a_2 — модуль ускорения самолёта в точке D?

Часть 2. «Реальная» невесомость.

В этой части задачи будем учитывать силу сопротивления воздуха F_c и будем считать, что она пропорциональна квадрату скорости самолёта: $F_c = -\beta v^2$, где β — некоторый постоянный коэффициент. Пилоты по-прежнему стараются реализовать состояние невесомости на борту самолета.

2.1 Найдите зависимость мощности двигателя $P_0(t)$ от времени на участке ABC траектории.

2.2 При движении вблизи точки C пересечения верхней и нижней парабол (т.е. практически «по прямой») пассажиры испытывают резкий толчок. С чем, по вашему мнению, связано данное явление?

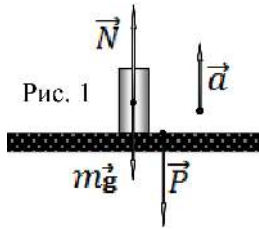
Решение

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.

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)

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

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 ($P = 0$) никак не получится.

При направлении ускорения лифта «вниз» ситуация меняется

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

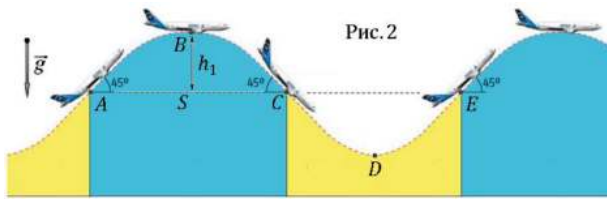
Следовательно, при движении лифта вниз с ускорением $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ будет наступать состояние невесомости

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

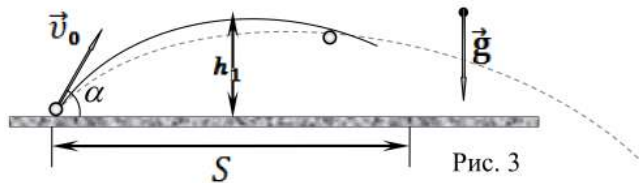
$$P_{\downarrow} = m(\mathbf{g} - \mathbf{g}) = 0. \quad (3)$$

Как следует из (3) лифт может двигаться в любом направлении (опускаться, ускоряясь или подниматься, замедляясь), но с ускорением $a_1 = g$, 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 $a_1 = g$, оно находится в состоянии невесомости. Поскольку при движении в поле



выключает двигатели (Рис. 2) и переходит на параболу, ничем не отличающуюся от движения камешка



тяжести земли это условие выполнено, то приходим к выводу, что при движении по параболе (под действием одной силы тяжести $m\vec{g}$) 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_n можно воспользоваться известной формулой для времени полёта тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0

$$t_n = \frac{2v_{0y}}{g} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} = 26,0 \text{ с.} \quad (4)$$

Хотя полученное значение t_n 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

$$v_1 = v_{0x} = v_0 \cos \alpha = 460 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 128 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

радиус R кривизны параболы в

$$v_1 = v_{0x} = v_0 \cos \alpha = 460 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 128 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5)$$

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

$$(6)$$

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

$$h_1 = \frac{v_0^2 (\sin \alpha)^2}{2g} = 835 \text{ м}$$

CDE по условию симметрии

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

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

$$v_2 = \sqrt{v_0^2 + 2gh_1}$$

$$v_2 = \sqrt{v_0^2 + 2gh_1}. \quad (8)$$

Следовательно, центростремительное ускорение самолета будет направлено вверх и равно

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

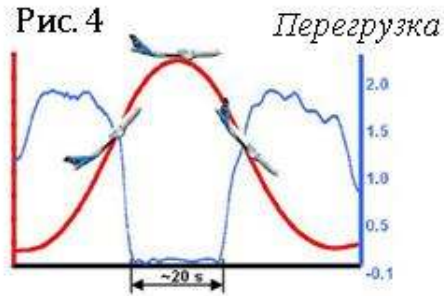
$$a_2 = \frac{v_2^2}{R} = \frac{v_0^2 + 2gh_1}{v_1^2} g = 29,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 3,00 g \quad (9)$$

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

$$\eta = \frac{a_2}{g} = 3,00$$

$$\eta = \frac{a_2}{g} = 3,00 \quad (10)$$



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

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

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

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_t постоянно компенсировать действующую на самолёт силу сопротивления воздуха $F_c = -\beta v^2$.

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

$$P_{\text{д}}(t) = F_{\text{т}} \cdot v = F_{\text{с}} \cdot v = \beta v^3$$

$$P_{\text{д}}(t) = F_{\text{т}} \cdot v = F_{\text{с}} \cdot v = \beta v^3 \quad (11)$$

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

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

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

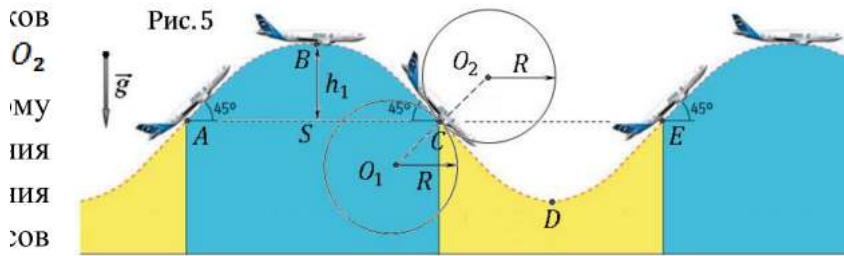
Соответственно, искомая мощность

$$P_{\text{д}}(t) = \beta \sqrt{v_{0x}^2 + (v_{0y} - gt)^2}^3 = \beta \left(\sqrt{v_0^2 - 2v_0 \sin \alpha gt + g^2 t^2} \right)^3$$

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

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.