

УДК 531.62

МЕРТВАЯ ПЕТЛЯ**A DEAD LOOP**

С.Е. Пестрикова

Государственное нетиповое общеобразовательное учреждение

«Лицей № 84 им. В.А. Власова»

г. Новокузнецк

Аннотация. В статье рассматривается движение тела по «мертвой петле». Выполнен расчет минимальной высоты, достаточной для совершения «мертвой петли», а также создана установка и проведены эксперименты для проверки теории на практике. Расчет перегрузок для высот $4R, 5R$, где R – радиус петли. Изучение применения «мертвой петли» в жизни.

Abstract: The article discusses the movement of the body in a "dead loop". The calculation of the minimum height sufficient to make a "dead loop" was carried out, as well as an installation was created and experiments were conducted to test the theory in practice. Calculation of overloads for heights $4R, 5R$, where R is the radius of the loop. The study of the use of a "dead loop" in life.

Ключевые слова: петля, установка, движение шарика, закон сохранения энергии, перегрузки.

Keywords: loop, installation, ball movement, law of conservation of energy, overload.

Движение в нашей жизни играет большую роль. Наукой, описывающей механическое движение, т.е. изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени, называется механика. Движение бывает разным, в зависимости от характеристик. По траектории: прямолинейное, криволинейное и т.д; по характеру скорости: равномерное, неравномерное. Таким образом, видов движения очень много.

Одним из видов движения является движение по окружности. Оно часто нам встречается в жизни: вращение колес машины, детские карусели, аттракционы, движение автомобиля. Одним из примеров такого движения является «Мертвая петля» - в авиации фигура высшего пилотажа. Мы будем рассматривать движение шарика по установке. Данная тема выбрана нами так как в фильмах часто можно увидеть американские горки с элементом «мертвой петли» и стало интересно, как же это работает. Поэтому решили рассмотреть «мертвую петлю» с точки зрения физики процесса.

Цель исследования: изучить понятие «мертвая петля»; изучить условия и механику выполнения «мертвой петли».

Задача исследования: ознакомиться с теоретическим материалом; рассчитать минимальную высоту, которой будет достаточно, чтобы тело могло совершить «мёртвую петлю»; собрать установку и посмотреть, совпадут ли расчеты с практикой; рассмотреть практическое применение механического процесса.

Объект изучения: движение шарика по траектории «мертвая петля».

Предмет изучения: расчет минимальной высоты, достаточной для совершения шариком «мертвой петли»

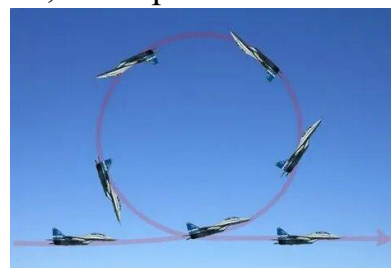
Гипотеза: Предположение о том, что шарик будет совершать «мертвую петлю», если будут соблюдены определенные условия:

- Правильно рассчитать минимальную высоту, необходимую для совершения «мертвой петли».

- Выбрать материал с минимальным коэффициентом трения, для проведения более качественного эксперимента.

- Методы: изучение теории, наблюдение, расчет, эксперимент

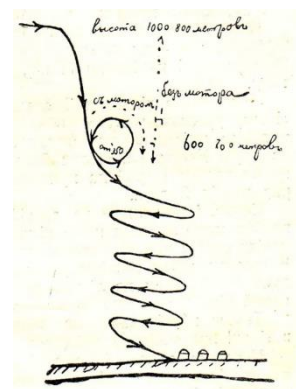
«Мёртвая петля» - в авиации, это фигура высшего пилотажа в виде замкнутой петли в вертикальной плоскости. В России её также называют «петлёй Нестерова». Своё название «мёртвая петля» получила из – за того, что долгое время она существовала только в теории, а в живую ее никто не мог повторить, так как самолёты не выдерживали перегрузок и разрушались в воздухе, лётчики погибали.



Впервые «мёртвую петлю» исполнил российский лётчик - Пётр Нестеров. В 1912 году, ещё во время обучения в авиационной школе в Гатчине в Варшаве, лётчик говорил о возможности выполнения «мертвой петли» на практике. На протяжении года лётчик теоретически и практически изучал возможность такого полета. Он обращался за разъяснением некоторых сложных вопросов аэродинамики к профессору Жуковскому и сделал схему «мертвой петли».



Свой полет лётчик совершил 9 сентября 1913 года в Киеве над Сырецком полем. Поднявшись на высоту примерно 1000 метров, Пётр Нестеров выключил мотор и начал круто, почти вертикально, планировать. Снизившись, таким образом, до высоты 600 метров и приобретя большую скорость, русский лётчик включил мотор и выровнял машину. Затем начал поднимать самолёт круто вверх, и самолёт

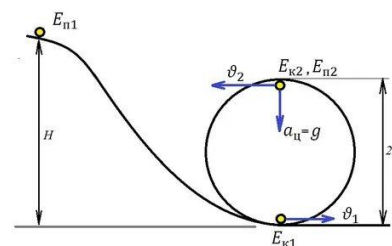


сделал круг в вертикальной плоскости

Схема «мёртвой петли»,
выполненной Петром
Нестеровым.

«Мёртвая петля» представляет собой 2 вида движения. Первое – это движение вниз по наклонной плоскости, второе – движение по окружности. Мы рассмотрим случай, где «мёртвую петлю» будет выполнять шарик в проектируемой установке.

В начале траектории шарик обладает потенциальной энергией, так как он находится на некой высоте h . Далее шарик катится вниз по наклонной плоскости, потенциальная энергия уменьшается, кинетическая возрастает, часть энергии уходит на работу силы трения, и у начала самой петли потенциальная энергия равняется нулю (так как $h=0$), шарик обладает только кинетической энергией. Далее шарик движется по окружности со скоростью v , поднимается на высоту $2R$, где R -радиус окружности, также часть энергии уходит на работу силы трения. В высшей точке траектории шарик обладает потенциальной энергией и кинетической (так как он движется по окружности с какой-то постоянной скоростью и поднимается на высоту $2R$).



В замкнутой системе при действии сил трения механическая энергия не сохраняется. Полная механическая энергия уменьшается. Исходя из этого запишем закон сохранения полной механической энергии с учетом потерь на работу сил трения.

$$E_{п1} + A_{тр1} = E_{п2} + E_k + A_{тр2},$$

Где $E_{п1}$ – потенциальная энергия при спуске шарика по наклонной плоскости; $E_{п2}$ – потенциальная энергия при подъёме до высшей точки окружности; E_k – кинетическая энергия; $A_{тр1}$ – работа силы трения по наклонной плоскости; $A_{тр2}$ – работы илы трения при движении по окружности.

$$E_k = mv^2/2; E_{п} = mgh$$

$$mgh + A_{тр1} = mv^2/2 + mgH + A_{тр2}, \text{ где } H = 2R$$

$$mgh + A_{тр1} = mv^2/2 + mg2R + A_{тр2} (*)$$

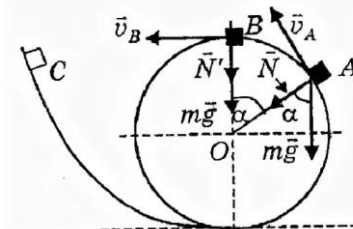
Из данного уравнения неизвестно чему равны работы сил трения и скорость, с которой шарик будет двигаться по окружности. Сначала найдем скорость.

Шарик движется по окружности с постоянным по модулю центростремительным ускорением. Рассмотрим высшую точку окружности В. Считаем, что в этой точке тело будет отрываться, в следствии $N = 0$. Запишем уравнение динамики с проекцией на ось ox :

Ox : $ma_{ц} = mg$, где $a_{ц} = v^2/R$, а массы сокращаются

$$V^2/R = g \quad V^2 = gR$$

Был найден квадрат скорости, с которой шарик будет двигаться по окружности. Теперь найдем работы сил трения



(1) $A_{тр} = F_{тр}l$, l – путь действия силы трения. Отсюда, $A_{тр1} = F_{тр1}l$

Из закона Амонтона – Кулона: $F_{тр} = \mu N$ (2)

μ – коэффициент трения шарика о наклонную плоскость, которой можно найти из таблицы коэффициентов трения различных материалов; N – сила реакции опоры. Чтобы ее найти, запишем уравнение динамики, при движении шарика по наклонной плоскости, с проекцией на ось y

. Oy : $0 = N - mg \cos \alpha$, где α – угол при основании наклонной плоскости

$$N = mg \cos \alpha$$

Рассмотрим наклонную плоскость как треугольник АКС. При геометрическом решении треугольника находим, что $l = \frac{h}{\sin \alpha}$. Теперь, подставляя в (1) подставляем значения силы реакции опоры и l , найдем $A_{тр1}$:

$$A_{тр1} = \mu mgh \cot \alpha \quad (**)$$

Далее найдем $A_{тр2}$. Для этого нужно найти $F_{тр2}$. Рассмотрим движение шарика по окружности. Запишем уравнение динамики для высшей точки траектории окружности В, с проекцией на ось ox :

$$Ox: ma_{ц} = N - mg$$

$$N = m(a_{ц} + g), \text{ где } a_{ц} = v^2/R = g \text{ (из расчётов выше)} \quad N = m\left(\frac{gR}{R} + g\right)$$

$$N = 2mg \quad \text{Подставляем } N \text{ в (2): } F_{тр2} = 2\mu mg$$

l в данном случае, будет равняться половине длине окружности, так как рассматривается движение шарика только до верхней точки траектории, $l = \pi R$. Подставляя в (1), получаем: $A_{тр2} = 2\mu mg \pi R$ (***) .
Найдены все неизвестные, подставляем в (*) уравнения (**) и (***).

$$mgh + \mu mgh \cot \alpha = \frac{mgR}{2} + 2mgR + 2\mu mg\pi R \quad \text{сокращаем на } m \text{ и } g:$$

$$h + \mu h \cot \alpha = \frac{R}{2} + 2R + 2\mu\pi R \quad h(1 + \mu \cot \alpha) = \frac{5R + 4\mu\pi R}{2}$$

$$h = \frac{R(5 + 4\mu\pi)}{2(1 + \mu \cot \alpha)}$$

μ и α – будут зависеть от характеристик проектируемой установки. В результате расчётов я нашла минимальную высоту, с которой нужно спустить шарик, чтобы он сделал «мёртвую петлю».

После выполнения теоретических расчётов, приступаем к изготовлению непосредственно установки «мёртвая петля», чтобы проверить полученные результаты на практике. За каркас установки взяли желоб, изготовленный из полипропиленовой армированной трубы. Первая трудность, с которой столкнулись, это получить из трубы желоб. Болгарки не было, пришлось резать ножом. Вторая проблема – это согнуть трубу по окружности, так как при сгибании труба сильно деформировалась, из-за чего не получалось ровной окружности и шарик вылетал из установки в разные стороны. Далее, так как с трубой не получилось, я решила попробовать сделать из металлической ленты, сгибалась она ровно, но к чему ее прикрутить, чтобы она не падала, так и не придумали.



В конечном итоге, пришлось вернуться к полипропилену, так как это материал с низким коэффициентом трения и гнется. Но на этот раз была взята не цельную трубу, а детали прямоугольной формы, из полипропилена, которые соединили с помощью крепежных элементов. Полученный желоб согнула по окружности и прикрепила к подставке. Установка готова.



Измеренные размеры установки:

$$R = 0,19 \text{ м} \quad \mu = 0,5 \quad l = 0,6 \text{ м} \quad l_1 = 1,01 \text{ м}$$

Угол α нашли по формуле $\cos^{-1} \alpha = \frac{l}{l_1}$, перед этим измерив длину, от начала петли до мысленно опущенного перпендикуляра от места, откуда начинает свое движение шарик и прямую от начала движения шарика до основания петли. Зная угол α , нашли $\cot \alpha$.

Следующий этап – это запуск шарика. Были проведены 5 экспериментов, запуская шарик с разной высоты. В результате, минимальная высота, с которой шарик совершил «мёртвую петлю», равна 0,79 м. Подставляя данные в полученную мной формулу расчета минимальной высоты, высота получилась равная 0,78 м, что совпадает с практической высотой в рамках погрешности 10%.

$$h_{\min} = H_{\text{теор}} = 0,78 \pm 0,08 \text{ (м)}$$

$$h_{\text{пр}} = 0,79 \text{ (м)}$$

Результаты расходятся, так как не учитывается вращательный момент шарика, а также сама установка выполнена не идеально.

Эксперимент	Высота, м
1	0,6
2	0,78
3	0,79
4	0,89
5	1

Далее взяла 3 шарика разной массы и запускала их с одинаковой высоты. В результате, все 3 шарика совершали «мертвую петлю». Отсюда можно сделать вывод, что масса шарика не влияет на совершение «мертвой петли», что подтверждает теоретический расчет, в котором минимальная высота запуска шарика не зависит от массы самого шарика.

Шарик	Масса, г
1	6
2	8
3	1



Отношение абсолютной величины линейного ускорения, к ускорению свободного падения на поверхности Земли, вызванные негравитационными силами называется перегрузкой. Шарик, совершая «мёртвую петлю», движется равно ускоренно, из – за чего вес становится больше mg , возникают перегрузки. Рассмотрим при какой высоте перегрузки будут смертельны, а какие нет.

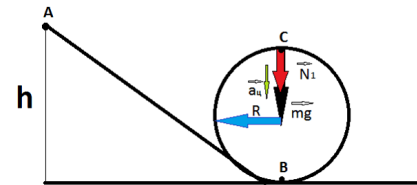
Перегрузки при $h = 4R$

Чтобы найти перегрузку, нужно определить вес в нижней и верхней точках петли. Запишем уравнение динамики для верхней точки петли С с проекцией на ось ox и выразим из него силу реакции опоры.

$$Ox: ma_{ц} = mg + N_1 \quad N_1 = m(a_{ц} - g) \quad N_1 = m(v^2/R - g)$$

Неизвестна скорость. Чтобы ее найти, запишем закон сохранения энергии, пренебрегая силой трения.

$$mgh = mv^2/2 + mg2R; 4gR = v^2/2 + 2gR; \\ V^2/2 = 2gR; V^2 = 4gR$$



Подставляем квадрат скорости в уравнение с N_1

$$N_1 = m\left(\frac{4gR}{R} - g\right); N_1 = 3mg; N_1 = P_1 \text{ (по III закону Ньютона)}; P_1 = 3mg \\ (1)$$

Теперь найдем вес для нижней точки траектории. Запишем уравнение динамики для точки В, с проекцией на ось ox и выразим N_2 .

$$ma_{ц} = N_2 - mg; N_2 = m(v^2/R + g)$$

$$\text{Закон сохранения энергии для точки В: } 4mgR = mv^2/2; V^2 = 8gR$$

$$\text{Подставляем в уравнение с } N_2: N_2 = 9mg$$

$$\text{По III закону Ньютона: } N_2 = P_2 \quad P_2 = 9mg$$

$$\text{Значит перегрузка в нижней точке петли: } n = \frac{9mg}{mg} = 9$$

$$\text{В верхней точке петли: } n = \frac{3mg}{mg} = 3$$

Перегрузка в 3 раза считается не смертельной для человека, а вот 9 раз уже может быть смертельной.

Перегрузки при $h = 5R$

Перегрузки будут рассчитываться также, как и в предыдущем случае.

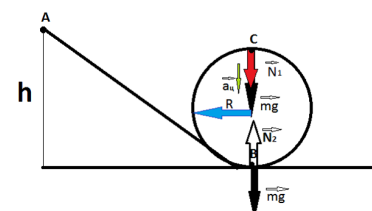
$$\text{Точка С: } N_1 = m(v^2/R - g) \quad 5mgR = mv^2/2 + 2mgR \quad V^2 = 6gR$$

$$\text{Подставляем: } N_1 = 5mg \quad P_1 = 5mg$$

Точка В:

$$N_2 = m(v^2/R + g); 5mgR = mv^2/2; V^2 = 10gR; \\ N_2 = 11mg; P_2 = 11mg$$

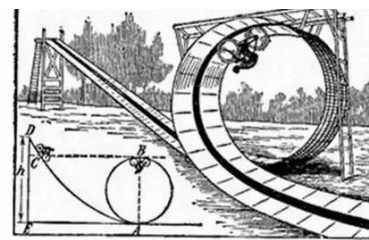
$$\text{Перегрузки при } h = 5R \text{ равны: } n_1 = 5; n_2 = 11$$



Перегрузка равная $11mg$, уже смертельная. Соответственно петля, с высотой $h = 5R$, будет «роковой» для человека.

1. Авиация.

Выполнение мертвой петли произвело фурор во многих странах мира – люди впервые узнали, что самолет способен выполнять такие фигуры. И петля Нестерова может пригодиться в реальных боевых условиях – например, для ухода от противника. Бессмертие Петру Нестерову обеспечила мертвая петля, открывшая эпоху высшего пилотажа не только в России, но и в мире.



При полетах в самолете летчики испытывают перегрузки. Пилоты, чтобы без потери сознания переносить сильные кратковременные перегрузки, проходят комплекс специальной подготовки.



Пилотов обучают маневрам в условиях антигравитации. Это особый набор сокращений, которые сжимают мышцы живота и бёдер и физически толкают кровь вверх, к сердцу, чтобы мозг снабжался кислородом.

Ещё пилоты носят специальные противоперегрузочные костюмы. Они представляют собой корсет со шлангами, надувающимися от воздушной системы и удерживающими наружную поверхность тела человека, немного препятствуя оттоку крови.

Тренировки в центрифуге. Центрифуга – это испытательный стенд, в котором при вращении создаётся центростремительное радиальное ускорение, имитирующее ускорение летательного аппарата. Космонавты надевают специальный скафандр и занимают позицию в кресле центрифуге. Она начинает вращаться, создавая перегрузки, которые могут достигать $8g$. Во время тренировки измеряются физиологические реакции, такие как частота сердечных сокращений и артериальное давление.



Элемент «мертвой петли» можно увидеть на американских горках. Первая такая появилась в 1895 году в Антлантик - Сити. Открытие горки прошло успешно и новые аттракционы стали пользоваться популярностью. Но в 1965 году вагонетка в Париже в верхней точке потеряла контакт с рельсами. После чего почти 20 лет новые горки строились без петлевого элемента. Со временем нашли решение данной проблемы, горки стали

делать петлю не круглой формы, а капли, с максимальным изгибом в верхней точке.

В цирке выполняются номера с элементами «мертвой петли» на велосипедах и мотоциклах.

Проделанная работа о расчете минимальной высоты «мёртвой петли» может быть полезна при решении задач на данную тему. Также при совершении фигур высшего пилотажа лётчики используют расчеты оптимальной высоты, чтобы совершить данный маневр. Так, перед тем как исполнить «мёртвую петлю», Нестеров рассчитывал высоту, на которую ему нужно подняться и на какую опуститься, чтобы сделать «мёртвую петлю». Так же данные расчёты могут помочь при изготовлении установки «мёртвая петля».

Список литературы

1. Физика. Механика. 10 кл. / М. М. Балашов, А. И. Гомонова, А. Б. Долицкий и др.; под ред. Г. Я. Мякишева. – 13-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2011. – 495, [1] с.: ил.

2. Физика: учеб. Для 10 кл. с углубл. Изучением физики: профил. Уровень / [О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик и др.]; под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. – 10-е изд. – М.: Просвещение, 2007. – 431 с.: ил.

3. Сетевое издание TechInsider. Статья «Откуда у «мертвой петли» такое название: вы вряд ли догадывались». URL: <https://www.techinsider.ru/weapon/677553-pochemu-myortvaya-petlya-tak-nazyvaetsya/> (дата обращения: 03.03.25)

4. Сетевой ресурс DekaTop.com. Статья «Топ 10 фигур высшего пилотажа». URL: <https://dekator.com/archives/6876> (дата обращения: 04.03.25)

5. «Мёртвая петля» и «Чакра Фролова»: история этих фигур высшего пилотажа и их применение на различных типах самолётов URL: <http://olymp.as-club.ru/> (дата обращения: 05.03.25)

6. Вес и невесомость / Физика Phscs.ru. URL: <https://phscs.ru/physics10/weight> (дата обращения: 05.03.25)

7. Интернет-портал «Российской газеты». Дмитрий Григорьев «Видео тренировок пилотов на перегрузки опубликовали в интернете». URL: <https://rg.ru/2016/01/26/peregruz-site.html> (дата обращения: 05.03.25)

8. Сетевое издание TechInsider. Статья «Обезьяны, ведра и мертвая петля: как появились самые страшные американские горки» URL: <https://www.techinsider.ru/adrenalin/1619957-obezyany-vedra-i-mertvaya-petlya-kak-poyavilis-samye-strashnye-amerikanskie-gorki/?ysclid=m6hya0e9g5542914011> (дата обращения: 05.03.25)

9.Сетевой ресурс Рамблер — главные новости России и мира. Статья «Top Gun: как пилоты истребителей выдерживают высокие перегрузки». URL: <https://sport.rambler.ru/autosport/48717151-top-gun-kak-piloty-istrebiteley-vyderzhivayut-vysokie-peregruzki/> (дата обращения: 05.03.25)