

**Тамбовская ОШИ с ПЛП имени М. Расковой**

# **Петля Нестерова. Моделирование движения самолета**

Интегрированный урок по теме № 12 (аэродинамика) и  
теме № 6 (информатика и ИКТ)

27 февраля 2009 г.

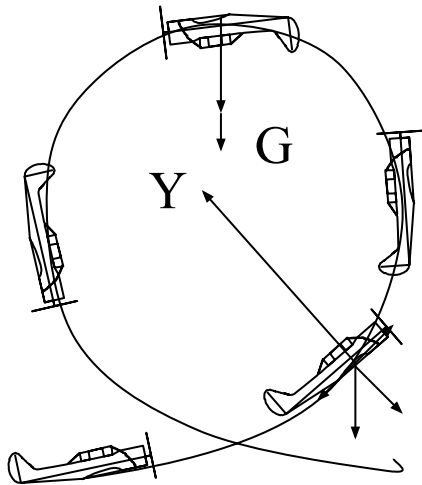
**Пётр Никола́евич Не́стеров** (27 февраля 1887 — 8 сентября 1914) — воспитанник Нижегородского кадетского корпуса, штабс-капитан, русский военный лётчик. Основоположник высшего пилотажа (петля Нестерова). Погиб в воздушном бою, впервые в практике боевой авиации применив таран.



Для доказательства своей идеи, согласно которой «в воздухе для самолета всюду опора», 27 августа 1913 года в Киеве над Сырецким полем П. Н. Нестеров впервые в мире выполнил на самолете «Ньюпор-4» с двигателем «Гном» в 70 л. с. замкнутую петлю в вертикальной плоскости. Этим маневром Нестеров положил начало высшему пилотажу.

# 1. Петля Нестерова. Схемы сил и условия выполнения

Петля Нестерова – это фигура пилотажа, при выполнении которой самолет выполняет замкнутую кривую в вертикальной плоскости с сохранением направления полета после вывода.



При вводе в петлю схема сил такая же, как на вводе в горку.

В верхней точке петли искривлению траектории вниз способствует, как сила тяжести, так и подъемная сила.

На выводе из петли схема сил такая же, как и при выводе самолета из пикирования.

Исследования показывают, что для выполнения петли необходимо:

- на вводе скорость должна быть не менее чем в два раза больше, чем минимально допустимая скорость;
- перегрузка при вводе в петлю должна быть не менее четырех.

## 2. Техника выполнения петли Нестерова

Перед выполнением петли наметить ориентир для вывода. Увеличить скорость до 300 км/час по прибору при оборотах двигателя 82% и полном наддуве. Плавным движением ручки на себя перевести самолет на кабрирование.

Продолжая выбирать ручку управления на себя, создать угловую скорость вращения с таким расчетом, чтобы при угле кабрирования  $40...50^{\circ}$  перегрузка была 4...4,5, а скорость в верхней части петли не менее 140 км/час.

В верхней точке петли с появлением в поле зрения горизонта уточнить положение самолета. Когда капот самолета подойдет к горизонту, убрать наддув и плавным движением ручки управления на себя перевести самолет в пикирование.

При достижении скорости 200 км/час дальнейшим взятием ручки управления на себя выходить в горизонтальный полет с таким расчетом, чтобы скорость в конце вывода была равна 260..270 км/час. При угле пикирования  $50...40^{\circ}$  увеличить наддув двигателя до необходимой величины для выполнения следующего задания.

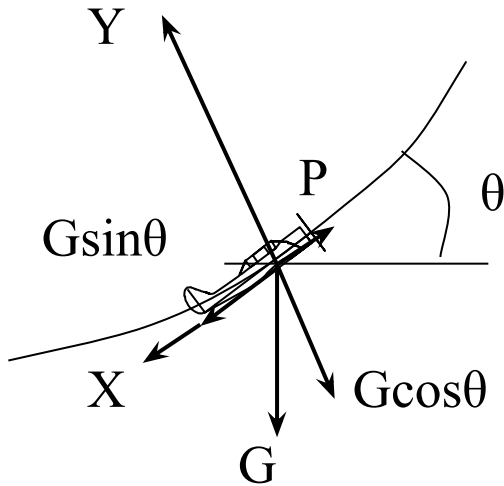
### 3. Уравнения движения самолёта при выполнении пилотажа в вертикальной плоскости

Уравнения движения самолета, как материальной точки, можно записать на основании второго закона Ньютона.

$$F = m \cdot a$$

Это уравнение можно переписать в виде:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{dV}{dt}$$



В поточной системе координат уравнения в проекциях на оси будут иметь вид:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{G} (P - X - G \sin \theta)$$

$$V \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{G} (Y - G \cos \theta)$$

После разделения переменных уравнения примут следующий вид:

$$dV = \frac{g}{G} (P - X - G \sin \theta) dt$$
 - изменение скорости при выполнении маневра;

$$d\theta = \frac{g}{GV} (Y - G \cos \theta) dt$$
 - изменение угла наклона траектории;

$$dL = \left(V + \frac{dV}{2}\right) \cos \theta dt$$
 - изменение длины пути в горизонтальной плоскости;

$$dH = \left(V + \frac{dV}{2}\right) \sin \theta dt$$
 - изменение высоты полета за время  $dt$ ;

$$V = V + dV$$

$$\theta = \theta + d\theta$$

$$L = L + dL$$

$$H = H + dH$$

$$t = t + dt$$

Формулы для вычисления сил:

$$c_y = c_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) \quad Y = c_y \rho \frac{V^2}{2} S$$

$$c_x = c_{x_0} + A \cdot c_y^2 \quad X = c_x \rho \frac{V^2}{2} S$$

$$P = P_0 - (V - 100) k_p$$

#### 4) Составление программы для эксперимента

```
DECLARE SUB tyaga ()
```

```
'Программа для исследования вертикальных маневров
```

```
CLS
```

```
INPUT "Введите начальную скорость"; VI
```

```
INPUT "Введите конечный угол наклона траектории"; Teta2
```

```
INPUT "Введите угол атаки"; alfa
```

```
INPUT "Введите временной шаг интегрирования уравнений"; dt
```

```
V = VI / 3.6
```

```
t = 0: L = 0: gp = 9.81: G = 1200: H = 500
```

```
cy = .084 * (alfa + 1): Teta = 0
```

```
WHILE Teta < Teta2
```

```
tyaga
```

```
dV = gp / G * (P - X - G * SIN(Teta)) * dt
```

```
dTeta = gp / (G * V) * (Y - G * COS(Teta)) * dt
```

```
L = L + (V + dV / 2) * COS(Teta + dTeta / 2) * dt
```

```
V = V + dV
```

```
Teta = Teta + dTeta
```

```
H = H + ((V + dV / 2) * SIN(Teta + dTeta / 2)) * dt
```

```
t = t + dt
```

```
VI = V * 3.6
```

```
IF VI < 130 THEN PRINT "VI<VI min доп.": STOP
```

```
Teta1 = Teta * 57.3
```

```
 $n_y = Y / G$ 
```

```
PRINT "VI="; VI, "ny="; ny, "Teta="; Teta1, "L="; L, "H="; H, "t="; t
WEND
PRINT : PRINT "VI="; VI, "Teta="; Teta1, "L="; L, "H="; H, "t="; t
END
```

```
SUB tyaga
```

```
SHARED G, X, P, V, VI, cy, Y
```

```
A = .062: cx0 = .0375: S = 15: ro0 = .125
```

```
Y = cy * ro0 * V ^ 2 / 2 * S
```

```
P0 = 438: kP = .932
```

```
cx = cx0 + A * cy ^ 2
```

```
X = cx * ro0 * V ^ 2 / 2 * S
```

```
P = P0 - (VI - 100) * kP
```

```
END SUB
```



## 5) Компьютерный эксперимент с моделью «Вертикаль»

Рассмотрим выполнение на самолете Як-52 петли Нестерова, с использованием программы, которой была составлена на предыдущем уроке.

а) Точность проведения численного эксперимента зависит от временного шага и выбранного закона управления самолетом.

Инструкция экипажу самолета Як-52 предписывает выполнение петли Нестерова при следующих условиях:

- скорость ввода 300 км/час;
- закон управления должен быть таким, чтобы в верхней точке петли скорость была не ниже 140 км/час.

Мы примем упрощенный закон управления: летчик в начальный момент задает самолету нужный угол атаки (нормальную перегрузку) и выдерживает его в процессе выполнения всей фигуры.

Для заданных условий определим нужный угол атаки, обеспечивающий в верхней точке петли скорость не ниже 140 км/час.

Выполним программу VERTIKAL при следующих условиях:  $\theta = 180^0$  (3.14 рад.)

|                                       |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|
| $V_{\text{нач.}}$ [км/ч]              | 300 | 300 | 300 |
| $\alpha$ [град.]                      | 8   | 10  | 11  |
| $dt$ [с]                              | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| $V_{\text{кон.}}$ [км/ч]<br>расчетная |     |     |     |

б) Компьютерный эксперимент по расчету характеристик Петли Нестерова, выполняемой на самолете Як-52, проведем с временным шагом  $dt=0.1$  при следующих условиях:  $V_{нач.} = 300$  км/ч; угол атаки =  $10.5^0$ , высота ввода 500 м. Для возможности фиксирования данных эксперимента угол наклона траектории будем задавать поэтапно через 0.5 радиана

| $\theta$ [рад] | $\theta$ [град.] | $n_y$ | $V$ [км/ч] | $t$ [с] | $L$ [м] | $H$ [м] |
|----------------|------------------|-------|------------|---------|---------|---------|
| 0.5            |                  |       |            |         |         |         |
| 1              |                  |       |            |         |         |         |
| 1.5            |                  |       |            |         |         |         |
| 2              |                  |       |            |         |         |         |
| 2.5            |                  |       |            |         |         |         |
| 3              |                  |       |            |         |         |         |
| 3.5            |                  |       |            |         |         |         |
| 4              |                  |       |            |         |         |         |
| 4.5            |                  |       |            |         |         |         |
| 5              |                  |       |            |         |         |         |
| 5.4            |                  |       |            |         |         |         |
| 6              |                  |       |            |         |         |         |
| 6.28           |                  |       |            |         |         |         |

5) Построить траекторию движения самолета с указанием около расчетных точек значений скорости, перегрузки, времени и угла наклона траектории.

Сделать выводы о возможности и условиях выполнения петли Нестерова на самолете Як-52