

# **Мягкая посадка на пневмоамортизаторы**

## **Математические методы анализа и проектирования космических систем**

Юдинцев В. В.

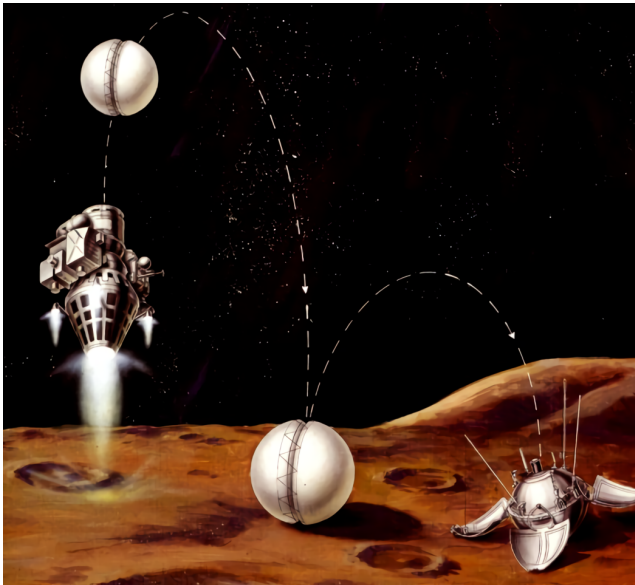
Кафедра теоретической механики

19 ноября 2025 г.



**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

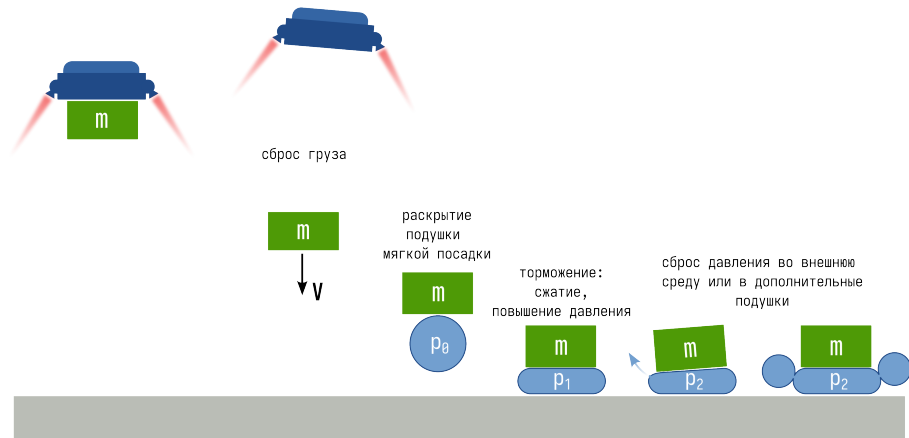
## Луна-9. Посадка: 3.02.1966. Масса АЛС: 100 кг



# Boeing CST-100 Starliner



# Составной пневмоамортизатор



Для приближенного анализа может быть использована упрощенная модель деформации пневмоамортизатора

- Не учитывается энергия деформации оболочки пневмоамортизатора
- Сила действия пневмодемпфера на посадочный модуль определяется разностью давлений между пневмоамортизатором и внешней средой и площадью контакта
- Закон изменения объема в пневмоамортизаторе определяется при заданном законе изменения его формы

# Цилиндрический пневмоамортизатор

- При деформации сохраняется длина  $L$  пневмоамортизатора и периметр  $P$  поперечного сечения
- Площадь контакта

$$A = s \cdot L$$

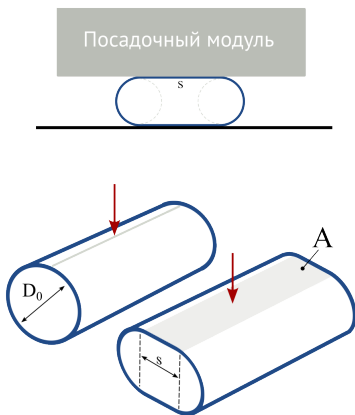
- Периметр

$$P = \pi D_0 = (D_0 - x)\pi + 2s = \text{const}$$

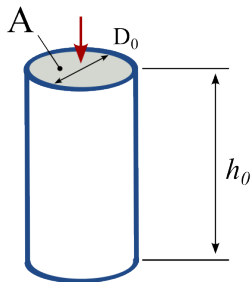
где  $x$  – поперечная деформация пневмоамортизатора

- Объем

$$V = \pi(D_0 - x)^2/4 + s(D_0 - x)$$

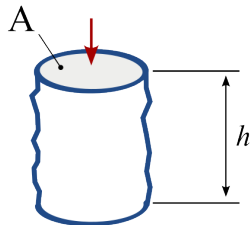


# Цилиндрический пневмоамортизатор



- При деформации сохраняется площадь контакта (диаметр сечения)
- Площадь контакта

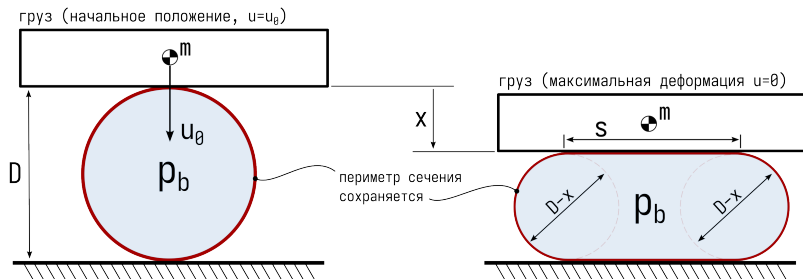
$$A = \pi D_0^2 / 4$$



- Объем

$$V = \pi D_0^2 h / 4$$

# Цилиндрический пневмоамортизатор



Условие сохранения периметра:

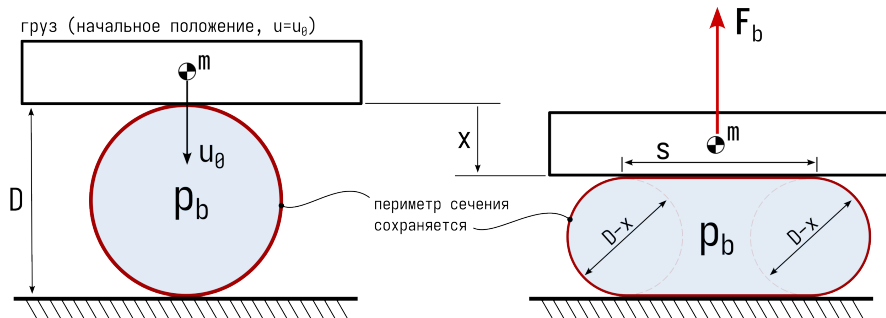
$$\pi D = \pi(D - x) + 2s$$

Зависимость объема от деформации:

$$V_b(x) = [\pi(D - x)^2/4 + s(D - x)]L_b$$



# Форма деформации

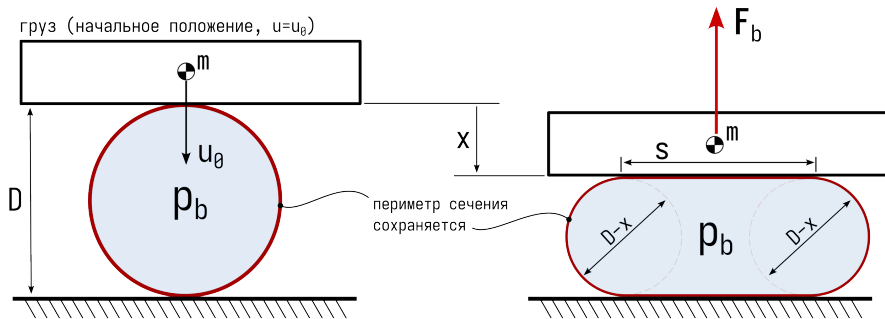


Сила, действующая на груз со стороны пневмоамортизатора:

$$F_b = (p_b - p_a)A_b = (p_b - p_a)sL_b$$

$p_a$  – внешнее давление,  $p_b$  – давление в подушке,  $A_b$  – площадь контакта подушки с грузом,  $L_b$  – длина пневмоамортизатора.

# Изменение давления в замкнутом пневмоамортизаторе

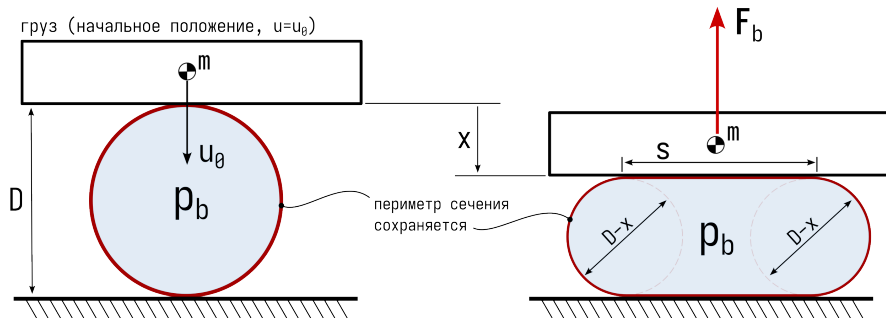


При адиабатном процессе (быстрый процесс сжатия без обмена энергией с внешней средой):

$$p_b = p_b^0 \left( \frac{V_b^0}{V_b} \right)^k = p_b^0 \left( \frac{D^2}{(D-x)^2 + 4s(D-x)/\pi} \right)^k$$

где  $k$  – показатель адиабаты ( $k \approx 1.4$  для воздуха).

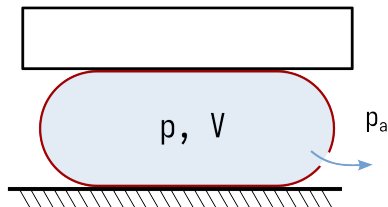
# Уравнение движения



Уравнение движения:

$$m\ddot{x} = mg - \left( p_b^0 \frac{D^2}{(D-x)^2 + 4s(D-x)/\pi} - p_a \right) sL_b$$

# Истечение газа из пневмоподушки



- В составе пневмоамортизатора есть клапан, открываемый при увеличении давления внутри подушки до некоторого заданного значения  $p^*$ .
- Эффективная площадь выходного отверстия равна  $A_e$
- Истечение происходит во внешнюю среду с давлением  $p_a$
- Процесс происходит без теплообмена с внешней средой (адиабатный)

# Закон изменения давления

Изменение давления в переменном объёме, связанном с внешней средой с постоянным давлением  $p_a$  [1]:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{k}{V_b} \left[ p^{\frac{3k-1}{2k}} \frac{A_e K \sqrt{RT_0}}{p_0^{\frac{k-1}{2k}}} \varphi\left(\frac{p_a}{p}\right) + p \frac{dV_b}{dt} \right],$$

- $A_e$  – эквивалентная площадь дренажа,
- $R = 287$  Дж/(кг·К) – газовая постоянная (воздух),
- $k = 1,4$  – показатель адиабаты (воздух),
- $p_0$  – начальное давление,
- $T_0$  – начальная температура,
- $K = \sqrt{2k/(k-1)}$ .

# Закон изменения давления

- $\varphi(\sigma)$  – функция расхода, определяемая перепадом давления между внешней средой и давлением в пневмоамортизаторе:

$$\varphi(\sigma) = \begin{cases} \sqrt{\sigma^{2/k} - \sigma^{(k+1)/k}} & \sigma^* < \sigma < 1 \\ \sqrt{\sigma_*^{2/k} - \sigma_*^{(k+1)/k}} & 0 < \sigma < \sigma_* \end{cases}$$

$\sigma^* = (2/(k+1))^{k/(k-1)}$  – критическое соотношение давлений

- При  $\sigma < \sigma_*$  скорость течения газа через дренажное отверстие достигает максимума (местная скорость звука); в этом случае функция расхода постоянна

Уравнение движения:

$$m\ddot{x} = mg - \pi(p - p_a)xL_b/2$$

$$\dot{p} = -\frac{k}{V_b} \left[ p^{\frac{3k-1}{2k}} \frac{A_e K \sqrt{RT_0}}{p_0^{\frac{k-1}{2k}}} \varphi\left(\frac{p_a}{p}\right) + p \dot{V}_b \right]$$

$$V_b = [\pi(D-x)^2/4 + s(D-x)]L_b$$

- 1 Е. В. Герц, Г. В. Крейнин Расчёт пневмоприводов Справочное пособие М.: Машиностроение, 1975.
- 2 Zhou X., Zhou S. M., Li D. K. Optimal Design of Airbag Landing System without Rebound // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 1 (531). С. 012001.
- 3 Lei B. [и др.]. Dynamic modeling and simulation for pneumatic landing airbag system with frictional contact // Thin-Walled Structures. 2024. (195). С. 111417.
- 4 Shen X., Wang X., Liu C. A review of airbag landing system for spacecraft // Chinese Journal of Aeronautics. 2025. № 8 (38). С. 103569.
- 5 Saad M. A. Compressible fluid flow. под ред. T. Aloisi, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1985.