

# **Отделение створок головного обтекателя**

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

Кафедра теоретической механики

Юдинцев В. В.

11 сентября 2025 г.



**САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
SAMARA UNIVERSITY

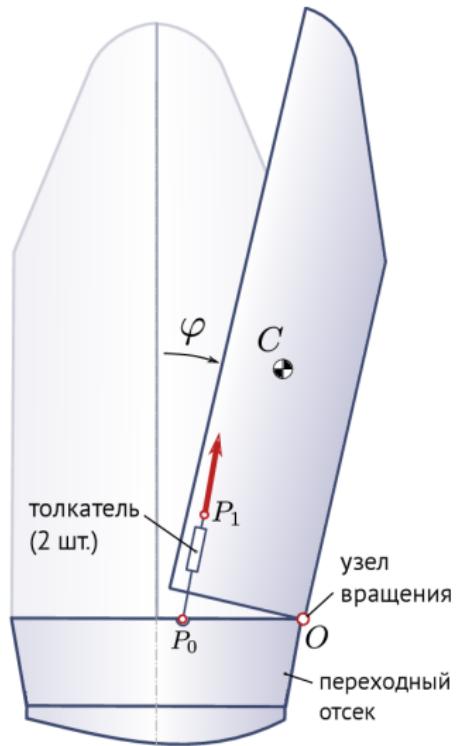
**Отделение створок головного обтекателя**

# Схема отделения головного обтекателя

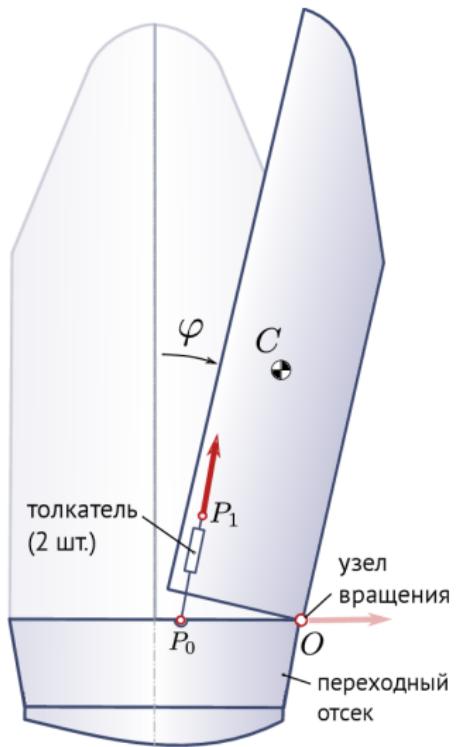


Головной обтекатель – элемент конструкции ракеты-носителя, предназначенный для защиты полезного груза от внешних тепловых и аэродинамических нагрузок при транспортировке полностью собранной РН или космической головной части к стартовому столу и во время атмосферного участка выведения РН.

# Схема отделения головного обтекателя



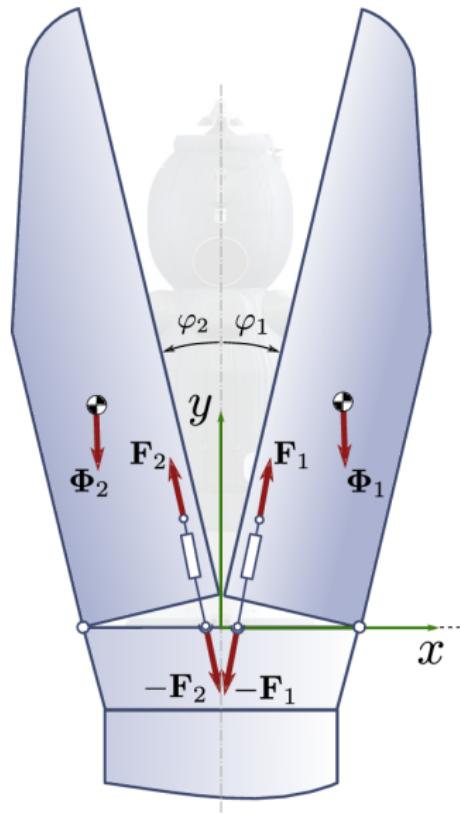
# Средства отделения



- Толкатели разворота створок (пружинные или пневматические)
- Узлы вращения
- В узлах вращения могут быть установлены толкатели для дополнительного воздействия на створку после её отделения

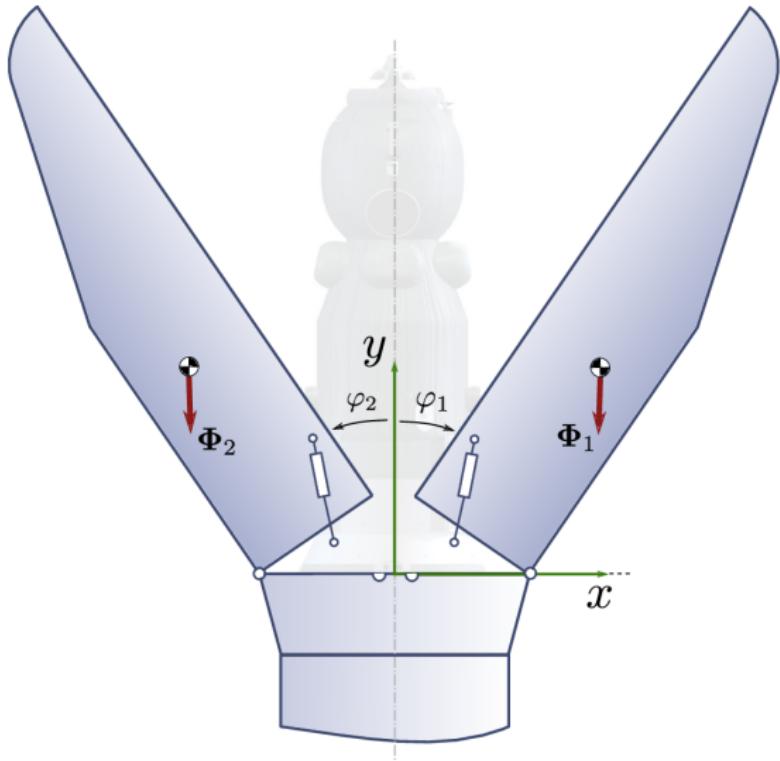
## **Этапы отделения створок ГО**

# Работа толкателей



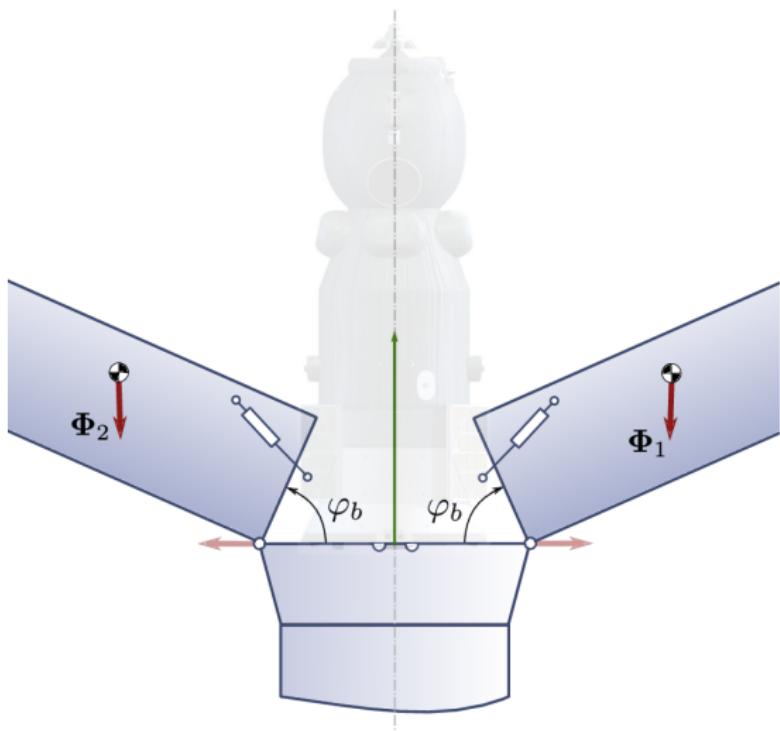
Раскрытие (освобождение) поперечного и продольного стыков и движение створок относительно РН под действием толкателей разворота и переносной силы инерции.

# Движение створки по действием силы инерции



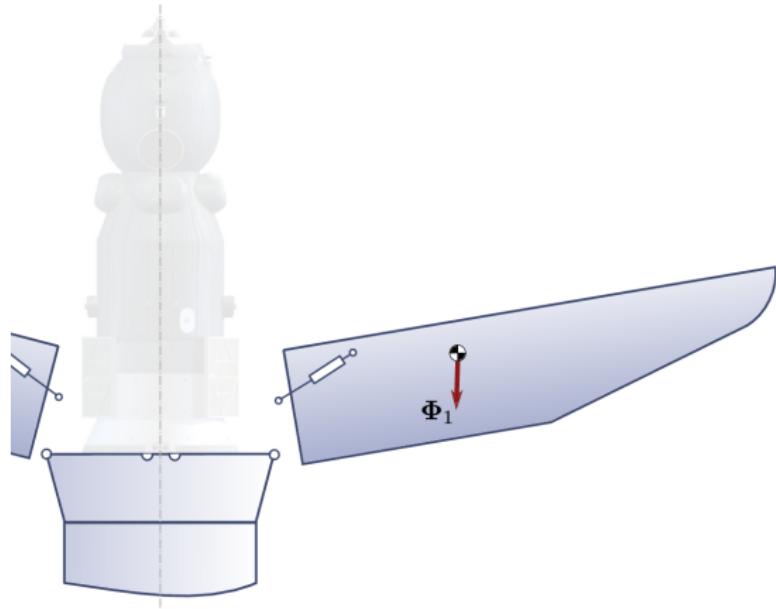
Движение створок  
относительно РН под  
действием переносной  
силы инерции, вызванной  
движением РН с  
ускорением под действием  
тяги её двигателей

# Потеря связи



Достижение створкой угла  
потери связи  $\varphi_b$ .  
Действие на створку  
толкателей, установленных  
в узлах вращения.

# Свободное движение створки



Свободное движение  
створки

# Вопросы

- Минимальная работа толкателей, обеспечивающая безударное отделение створок
- Определение угла потери связи
- Определение реакций в узле вращения створки

## **Исходные данные**

# Принятые допущения

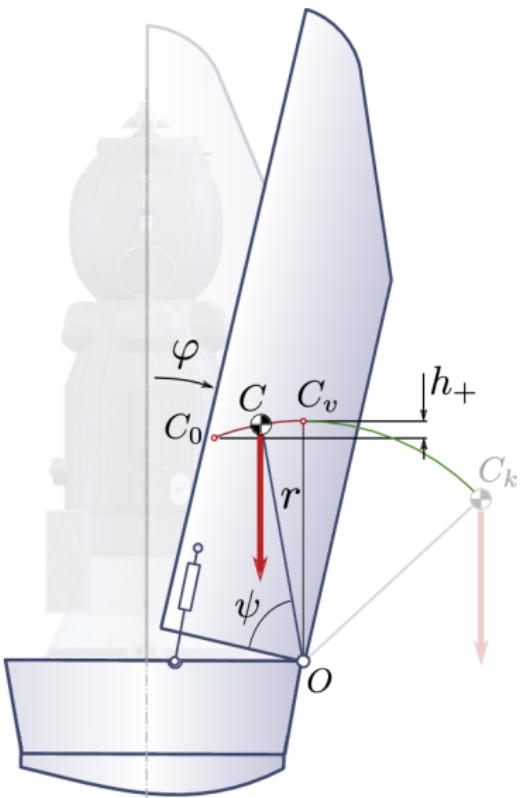
- Створки рассматриваются как абсолютно твёрдые тела.
- РН в процессе отделения движется с постоянным ускорением.
- Величина скоростного напора в процессе отделения не оказывает существенного влияния на движение створки.
- Сила толкателя пропорциональна перемещению его штока.

# Система отсчёта

- Движение створок рассматривается относительно **неинерциальной** системы координат  $Oxyz$ , связанной с РН, движущейся с заданным кажущимся ускорением  $n_x \vec{g}$ .
- Ориентация створки  $i$  задается углом  $\varphi_i$ , который отсчитывается от продольной оси РН до плоскости продольного стыка створки.

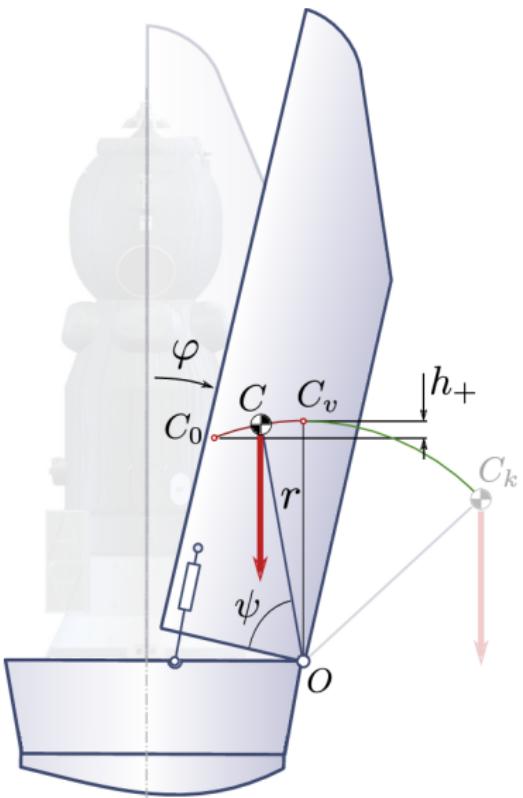
# **Работа толкателя**

# Работа переносной силы инерции



- При движении центра масс створки из начального положения  $C_0$  до положения  $C_v$  переносная сила инерции  $\Phi$  совершает отрицательную работу – препятствует развороту створки.
- Точка  $C_v$  определяется пересечением прямой, проходящей через ось вращения и параллельной вектору переносной силы инерции, с траекторией движения центра масс створки.

# Работа переносной силы инерции



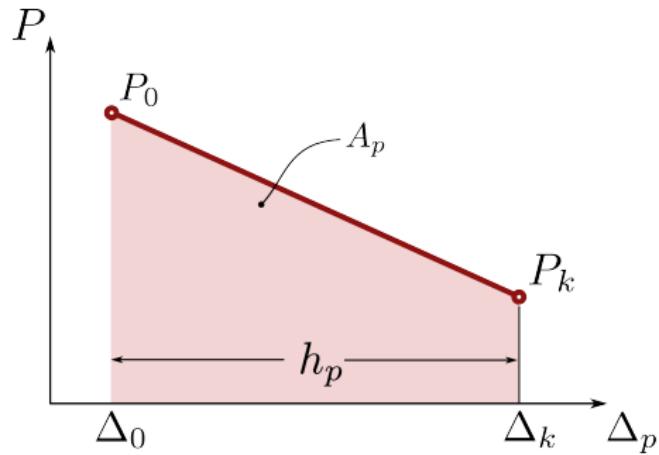
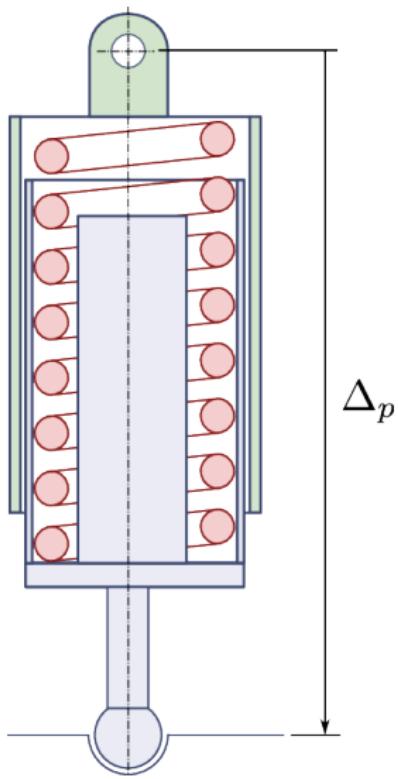
Работа переносной силы инерции при перемещении центра масс створки от начального положения – точки  $C_0$  до  $C_v$ :

$$A_{0v} = -\underbrace{r(\sin \psi - 1)}_{h_+} mgn_x < 0 \quad (1)$$

При перемещении центра масс из положения  $C_v$  в положение  $C_k$  (отделение створки) переносная сила инерции совершает положительную работу:

$$A_{vk} > 0 \quad (2)$$

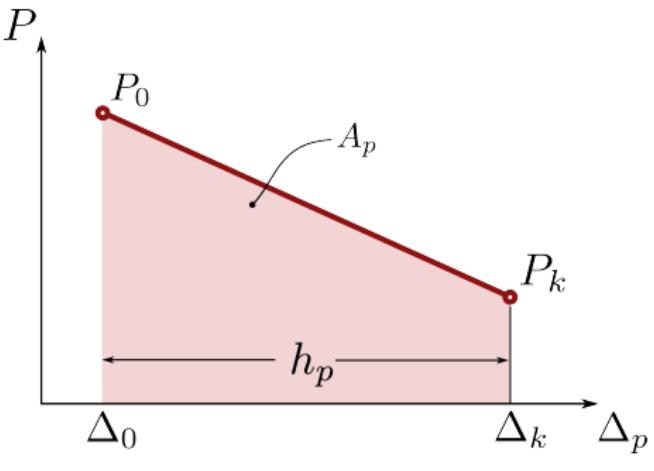
# Работа толкателей



# Работа толкателей

Работа одного толкателя:

$$A_p = \frac{P_0 + P_k}{2} h_p \quad (3)$$



- $P_0$  – начальное усилие толкателя;
- $P_k$  – конечное усилие толкателя;
- $h_p$  – ход толкателя.

## Необходимое условие безударного отделения створки

Суммарная работа толкателей разворота створки должна быть больше работы переносной силы инерции  $A_{0v}$ :

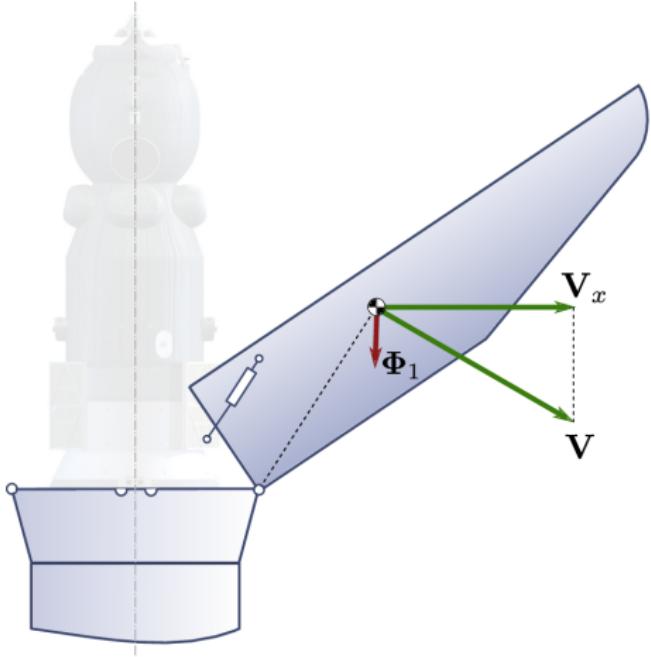
$$\sum A_p > A_{0v}. \quad (4)$$

В этом случае при отделении створки её угловая скорость всегда будет больше нуля:

$$\dot{\varphi} > 0. \quad (5)$$

## **Определение угла отделения створки**

# Максимум $V_x$



Предположим, что наилучшие условия отделения створки обеспечиваются при угле потери связи

$$\varphi_b = \arg \max V_x(\varphi) \quad (6)$$

Для определения скорости створки на момент её отделения используем теорему об изменении кинетической энергии.

# Теорема об изменение кинетической энергии

Теорема об изменении кинетической энергии створки

$$T_k - T_0 = A_p + A_{0k} \quad (7)$$

где

- $T_0$  – начальная кинетическая энергия относительного движения створки;
- $T_k$  – кинетическая энергия относительного движения створки в момент отделения;
- $A_p$  – суммарная работа толкателей разворота створки;
- $A_{0k}$  – работа переносной силы инерции при перемещении центра масс створки из начального положения в конечное – в момент потери связи.

## Кинетическая энергия створки

$$T_k = A_p + A_{0k} \quad (8)$$

Кинетическая энергия створки в момент её отделения:

$$T_k = \frac{J_O \omega_k^2}{2} \quad (9)$$

где  $J_O$  – момент инерции створки относительно оси её вращения.

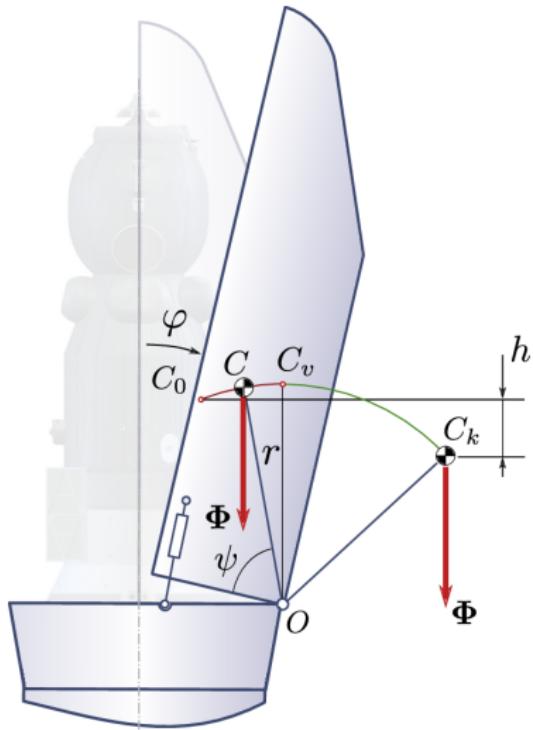
Подставляя (9) в (8)

$$\frac{J_O \omega_k^2}{2} = A_p + A_{0k}, \quad (10)$$

получим выражение для угловой скорости створки:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2(A_p + A_{0k})}{J_O}} \quad (11)$$

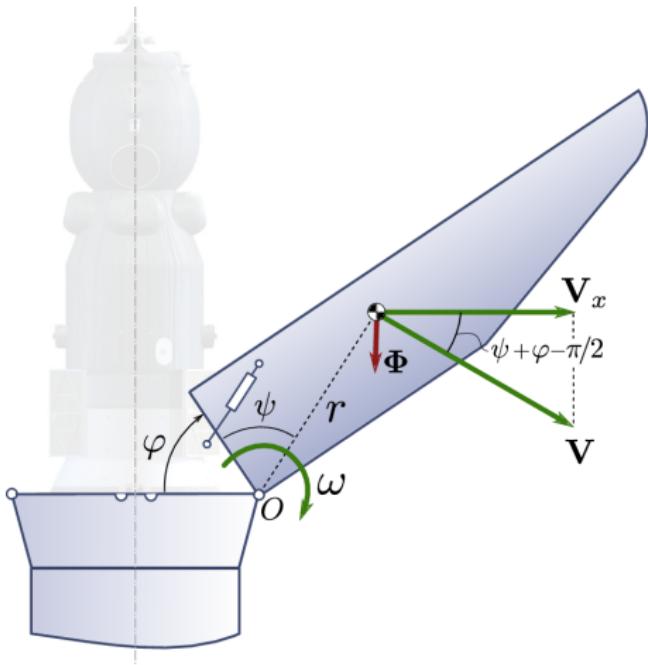
# Работа переносной силы инерции



Работа переносной силы инерции  $\Phi$  при перемещении центра масс створки из положения  $C_0$  в положение  $C_k$

$$\begin{aligned}A_{0k} &= \Phi h = \\&= \Phi[r \sin \psi - r \sin(\varphi + \psi)] = \\&= mgn_x r [\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)] \quad (12)\end{aligned}$$

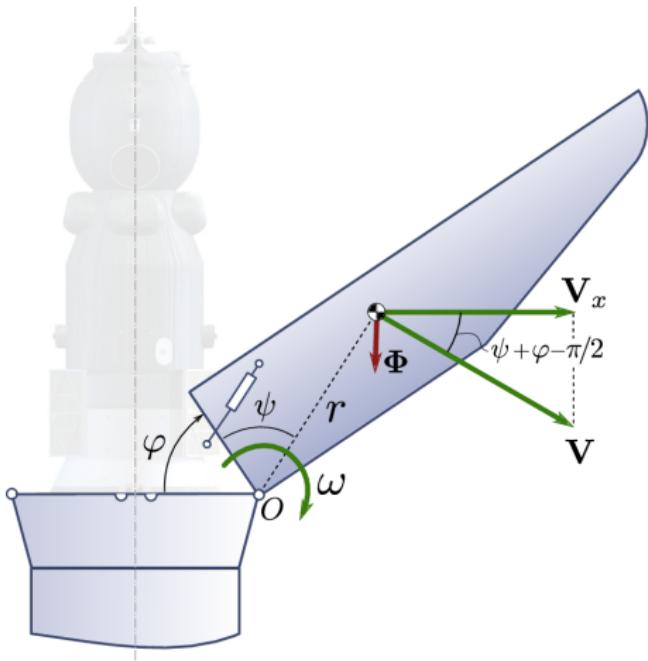
# Скорость створки



Скорость створки в момент её отделения:

$$V_k = \omega_k r = \sqrt{\frac{2(A_p + A_{0k})}{J_O}} r \quad (13)$$

# Скорость створки



Проекция  $V_x$  скорости створки в момент её отделения:

$$\begin{aligned} V_x &= \omega \cdot r \cos(\varphi + \psi - \pi/2) = \\ &= \omega \cdot r \sin(\varphi + \psi) = \\ &= \sqrt{\frac{2(A_p + A_{0k})}{J_O}} r \sin(\varphi + \psi) \quad (14) \end{aligned}$$

# Максимум поперечной скорости створки

Условие экстремума

$$\frac{\partial V_x}{\partial \varphi} = 0 \quad (15)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \sqrt{\frac{2(A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)])}{J_O}} r \sin(\varphi + \psi) \right] = 0 \quad (16)$$

## Максимум поперечной скорости створки

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \sqrt{\frac{2(A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)])}{J_O}} r \sin(\varphi + \psi) \right] = 0$$

$$\begin{aligned} & \frac{-2mgn_x r \cos(\varphi + \psi)}{2\sqrt{2(A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)])}} r \sin(\varphi + \psi) + \\ & + \sqrt{2(A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)])} r \cos(\varphi + \psi) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2(A_p + mgn_x r[\dots])}} \left\{ -mgn_x r^2 \cos(\varphi + \psi) \sin(\varphi + \psi) + \right. \\ & \left. + 2(A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)]) r \cos(\varphi + \psi) \right\} = 0 \end{aligned}$$

## Максимум поперечной скорости створки

$$\frac{1}{\sqrt{2(A_p + mgn_x r[\dots])}} \left\{ -mgn_x r^2 \cos(\varphi + \psi) \sin(\varphi + \psi) + \right. \\ \left. + 2(A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)])r \cos(\varphi + \psi) \right\} = 0$$

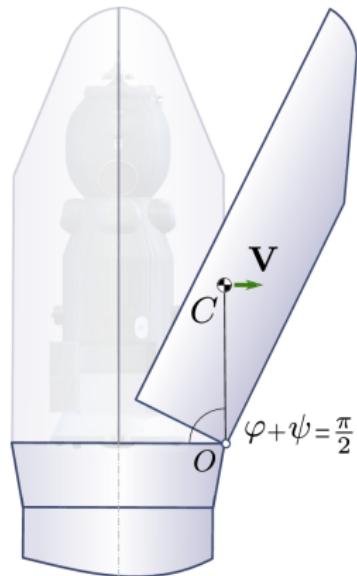
Учитывая, что

$$A_p + mgn_x r[\sin \psi - \sin(\varphi + \psi)] > 0,$$

раскрывая выражение в фигурных скобках, получим:

$$-mgn_x r^2 \cos(\varphi + \psi) \sin(\varphi + \psi) + 2A_p r \cos(\varphi + \psi) + \\ + 2mgn_x r^2 \sin \psi \cos(\varphi + \psi) - 2mgn_x r^2 \sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi + \psi) = 0$$

# Локальный минимум



После простых преобразований:

$$\cos(\varphi + \psi) \{ 2A_p + mgn_x r [2 \sin \psi - 3 \sin(\psi + \varphi)] \} = 0$$

имеет два решения. Первое решение:

$$\cos(\varphi + \psi) = 0 \Rightarrow \varphi + \psi = \pi/2 \quad (17)$$

соответствует локальному минимуму скорости.

## Локальный максимум

Из условия равенства нулю второго множителя выражения

$$\cos(\varphi + \psi) \{2A_p + mgn_x r[2 \sin \psi - 3 \sin(\psi + \varphi)]\} = 0$$
$$2A_p + mgn_x r(2 \sin \psi - 3 \sin(\psi + \varphi)) = 0 \quad (18)$$

определяется локальный максимум скорости

$$\sin(\varphi + \psi) = \frac{2}{3} \left( \frac{A_p}{mgn_x r} + \sin \psi \right) \quad (19)$$

С учётом  $\psi + \varphi > \pi/2$ :

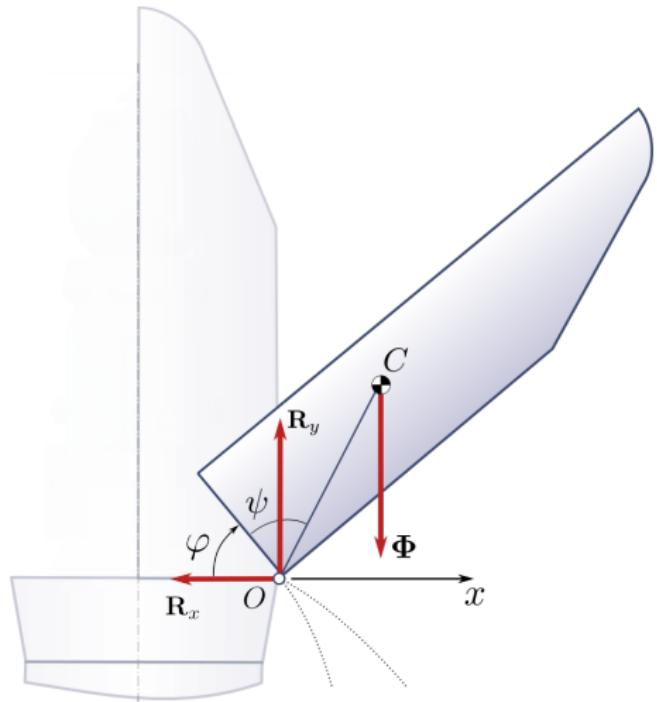
$$\boxed{\varphi = \pi - \arcsin \frac{2}{3} \left( \frac{A_p}{mgn_x r} + \sin \psi \right) - \psi}$$

## Пример

$$\varphi = \pi - \arcsin \frac{2}{3} \left( \frac{A_p}{mgn_x r} + \sin \psi \right) - \psi \quad (20)$$

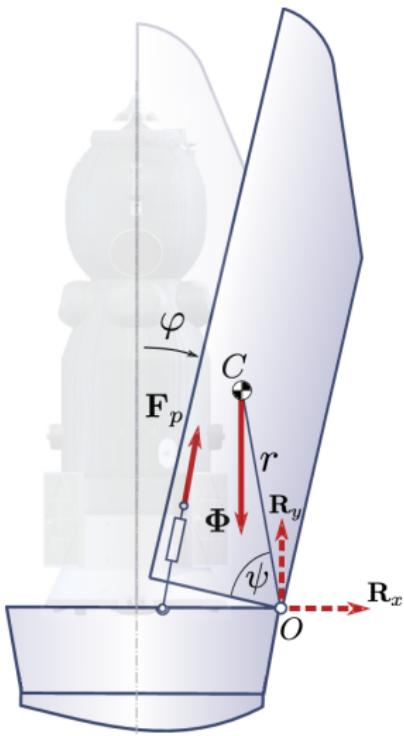
Для  $m = 700$  кг,  $g = 9.807$  м/с<sup>2</sup>,  $n_x = 1$ ,  $r = 5$  м,  $A_p = 7500$  Дж,  $\psi = 75^\circ$   
 $\Rightarrow \varphi = 53^\circ$

# Величина реакции связи в шарнире



- В момент отделения проекция силы реакции, действующей на створку, на направление поперечной оси должна быть отрицательной  $R_x < 0$ .
- При потери механической связи в момент  $R_x < 0$  шарнирная точка  $O$ , принадлежащая створке, будет двигаться в сторону от РН.

# Уравнение движения створки



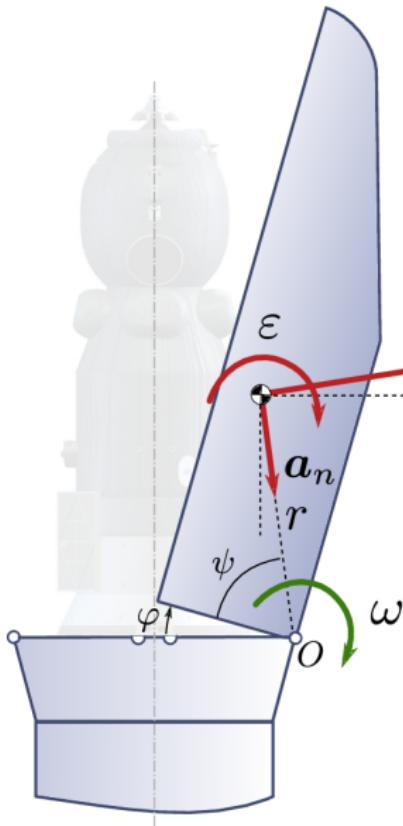
Для определения реакции  $R_x$  запишем уравнения движения створки после окончания работы толкателей:

$$m\ddot{x} = R_x, \quad (21)$$

$$m\ddot{y} = R_y - \Phi, \quad (22)$$

$$J_O \ddot{\varphi} = -\Phi \cdot r \cos(\varphi + \psi) \quad (23)$$

# Ускорение центра масс створки



Определим проекцию ускорения центра масс створки на ось  $Ox$ :

$$\ddot{x} = a_\tau \sin(\psi + \varphi) + a_n \cos(\psi + \varphi) \quad (24)$$

где  $a_\tau$  – касательное ускорение:

$$a_\tau = \varepsilon r = \ddot{\varphi} r \quad (25)$$

$a_n$  – нормальное ускорение:

$$a_n = \omega^2 r = \dot{\varphi}^2 r \quad (26)$$

## Силы реакции

Подставляя проекцию ускорения  $\ddot{x}$  в уравнение движения (21), получим:

$$R_x = mr[\ddot{\varphi} \sin(\psi + \varphi) + \dot{\varphi}^2 \cos(\psi + \varphi)] \quad (27)$$

Угловое ускорение определяется из уравнения (23)

$$\ddot{\varphi} = -\frac{mgn_x r \cos(\varphi + \psi)}{J_O} \quad (28)$$

Подставляя  $\ddot{\varphi}$  в (27), получим

$$R_x = mr \left[ -\frac{mgn_x r \cos(\varphi + \psi)}{J_O} \sin(\psi + \varphi) + \dot{\varphi}^2 \cos(\psi + \varphi) \right] \quad (29)$$

## Силы реакции

Угловую скорость  $\dot{\varphi}$  в выражении реакции

$$R_x = mr \left[ -\frac{mgn_x r \cos(\varphi + \psi)}{J_O} \sin(\psi + \varphi) + \dot{\varphi}^2 \cos(\psi + \varphi) \right] \quad (30)$$

определим из теоремы об изменении кинетической энергии:

$$\dot{\varphi}^2 = \frac{2}{J_O} \{A_p - mgn_x r (\sin(\varphi + \psi) - \sin \psi)\} \quad (31)$$

Подставив (31) в (30), после простых преобразований, получим

$$R_x = \frac{mr}{J_O} \cos(\varphi + \psi) \{2A_p + mgn_x r [2 \sin \psi - 3 \sin(\varphi + \psi)]\} \quad (32)$$

# Силы реакции

Выражение в фигурных скобках

$$R_x = \frac{mr}{J_O} \cos(\varphi + \psi) \{ 2A_p + mgn_x r [2 \sin \psi - 3 \sin(\varphi + \psi)] \} \quad (33)$$

равно нулю при максимуме проекции скорости створки на ось  $x$  (18):

$$2A_p + mgn_x r (2 \sin \psi - 3 \sin(\varphi + \psi)) = 0 \quad (34)$$

В момент достижения максимума проекции скорости центра масс створки на поперечную плоскость проекция силы реакции в оси вращения створки на эту же плоскость равна нулю.

## Силы реакции

При  $\pi/2 < \varphi + \psi < \pi$  и  $\cos(\varphi + \psi) < 0$  условие  $R_x < 0$  будет выполняться при

$$2A_p + mgn_x r [2 \sin \psi - 3 \sin(\varphi + \psi)] > 0 \quad (35)$$

или

$$\sin(\varphi + \psi) < \frac{2}{3} \left( \frac{A_p}{mgn_x r} + \sin \psi \right) \quad (36)$$

# Список использованных источников

- [1] Круглов Г. Е. Аналитическое проектирование механических систем. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева, 2001. – Р. 131.
- [2] Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет / Колесников К. С., Кокушкин В. В., Борзых С. В., and Панкова Н. В. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – Р. 373.
- [3] Кондратьев А. В., Чумак А. А., Стэнилэ К. Д. Сравнение систем крепления и отделения современных композитных головных обтекателей ракет-носителей // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2012. – №. 4. – Р. 165–177.
- [4] Юмашев Л. П. Головные обтекатели : (ил. материал по курсу "Конструкция и проектирование ЛА") : метод. указания. – Куйбышев : М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Куйбышев. авиац. ин-т им. С. П. Королева, 1990.