

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

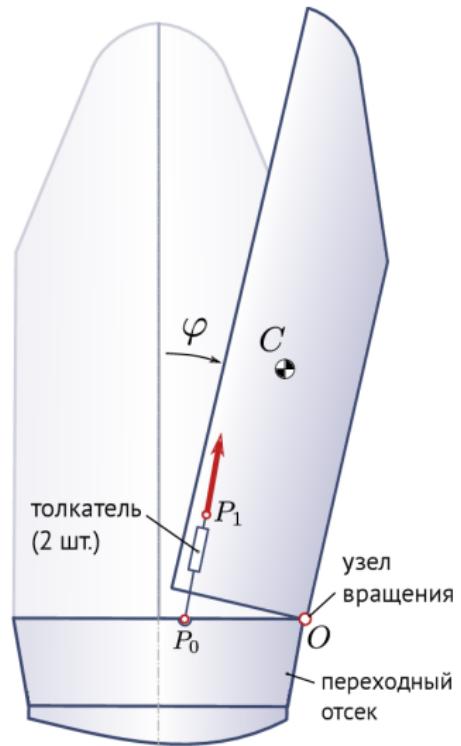
Отделение створок головного обтекателя

Схема отделения головного обтекателя

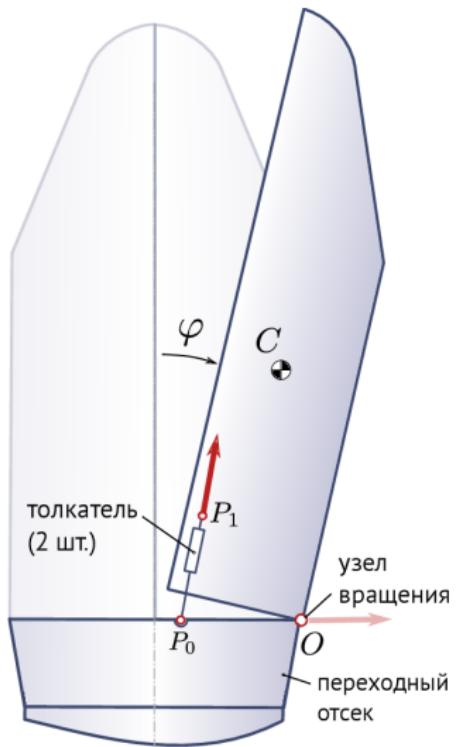


Головной обтекатель – элемент конструкции ракеты-носителя, предназначенный для защиты полезного груза от внешних тепловых и аэродинамических нагрузок при транспортировке полностью собранной РН или космической головной части к стартовому столу и во время атмосферного участка выведения РН.

Схема отделения головного обтекателя



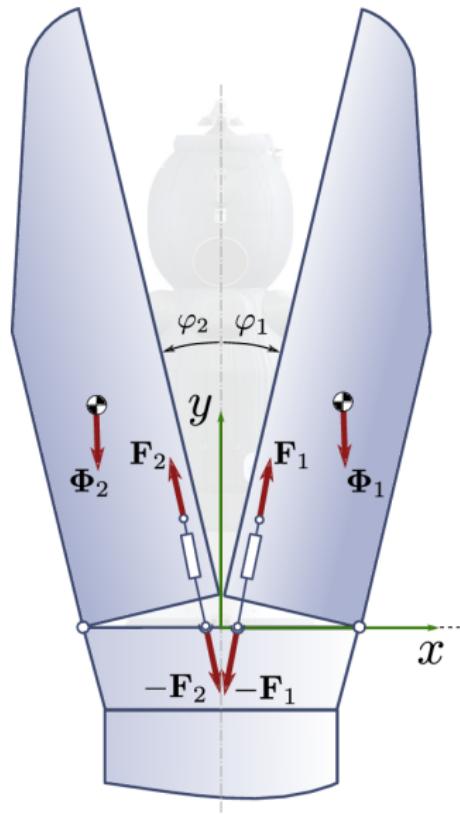
Средства отделения



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

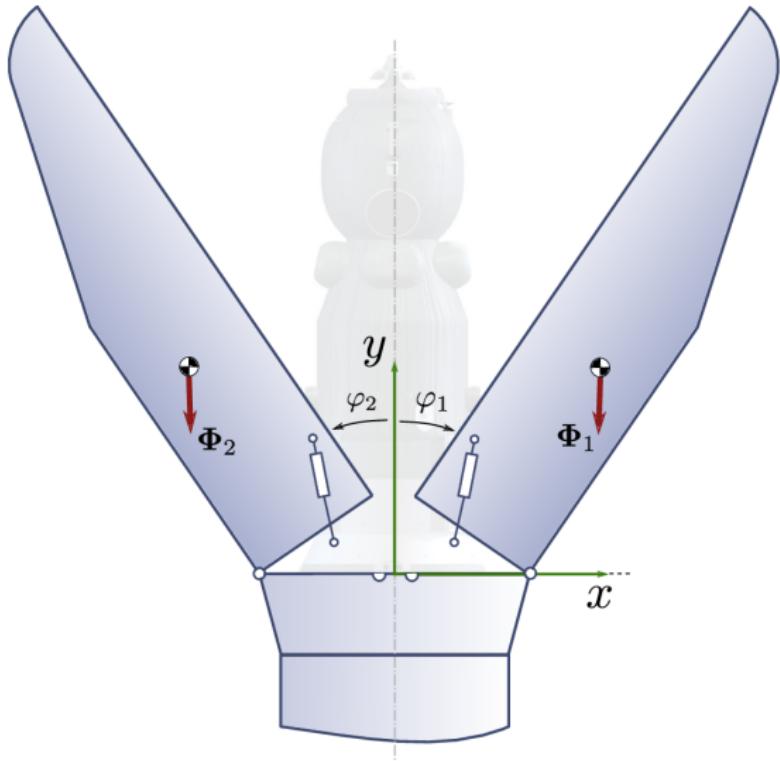
Этапы отделения створок ГО

Работа толкателей



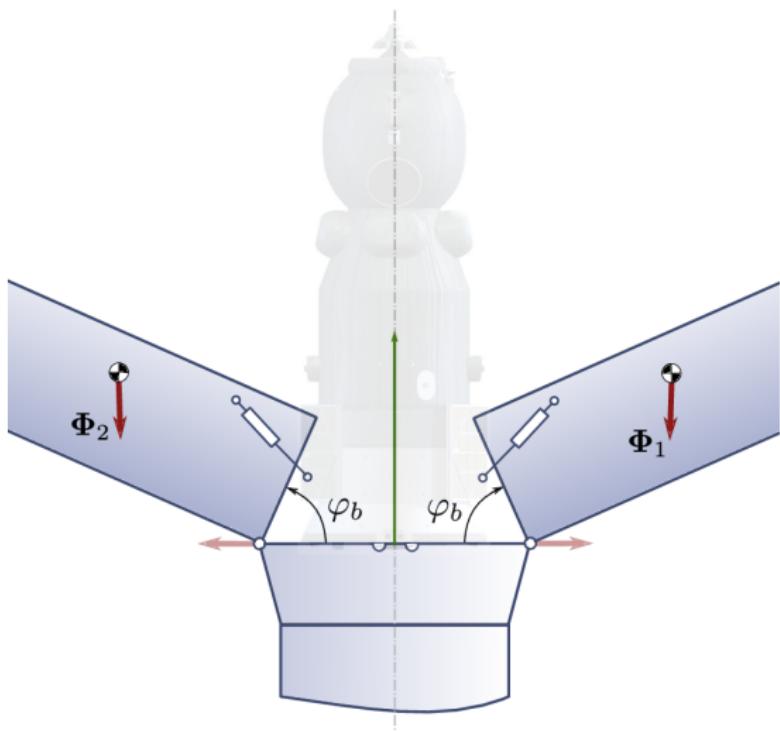
Раскрытие (освобождение) поперечного и продольного стыков и движение створок относительно РН под действием толкателей разворота и переносной силы инерции.

Движение створки по действием силы инерции



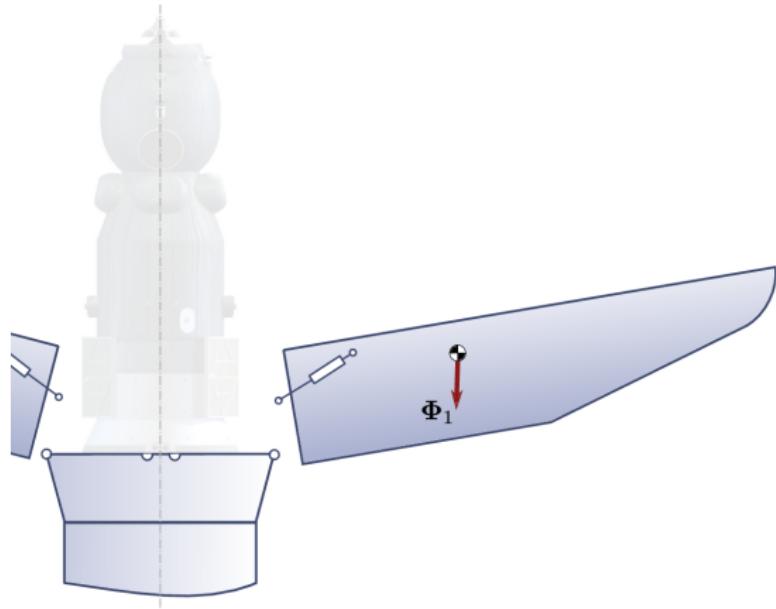
Движение створок
относительно РН под
действием переносной
силы инерции, вызванной
движением РН с
ускорением под действием
тяги её двигателей

Потеря связи



Достижение створкой угла
потери связи φ_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

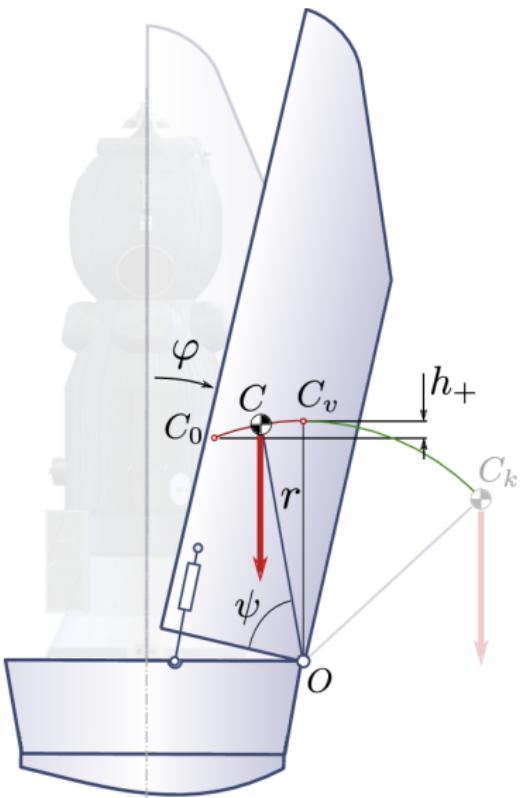
- Створки рассматриваются как абсолютно твёрдые тела.
- РН в процессе отделения движется с постоянным ускорением.
- Величина скоростного напора в процессе отделения не оказывает существенного влияния на движение створки.
- Сила толкателя пропорциональна перемещению его штока.

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 φ_i , который отсчитывается от продольной оси РН до плоскости продольного стыка створки.

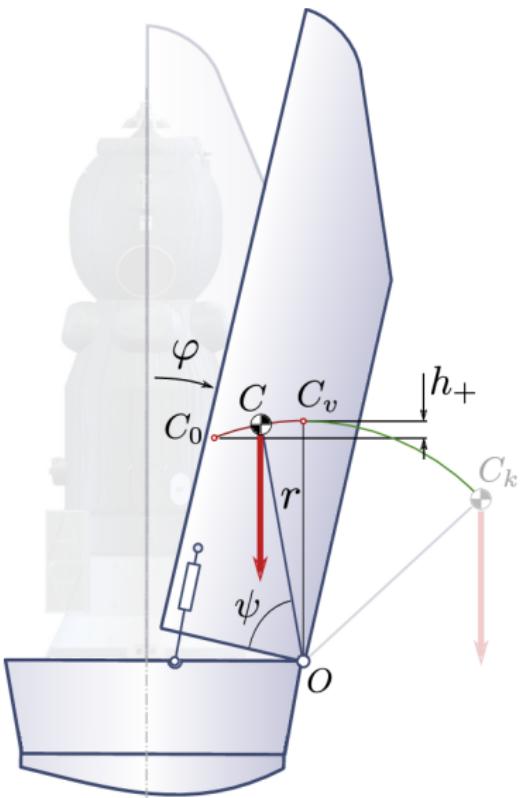
Работа толкателя

Работа переносной силы инерции



- При движении центра масс створки из начального положения C_0 до положения C_v переносная сила инерции Φ 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



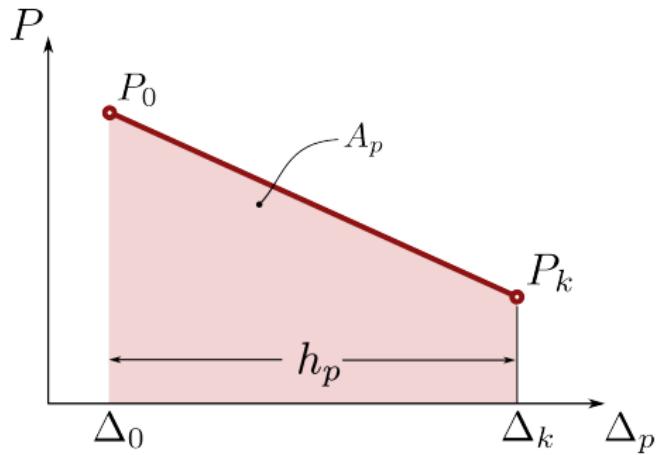
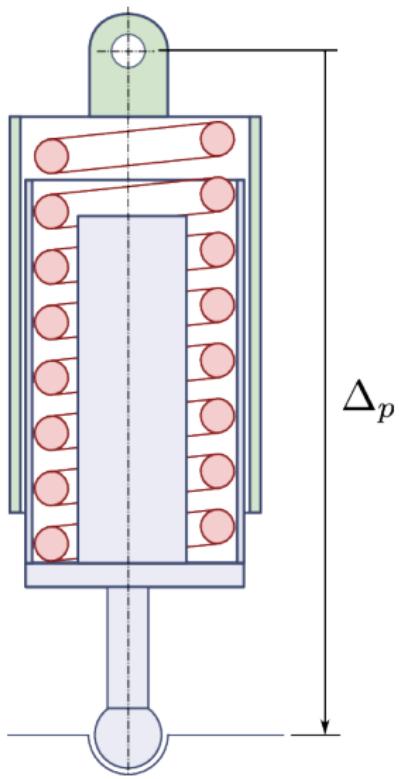
Работа переносной силы инерции при перемещении центра масс створки от начального положения – точки C_0 до C_v :

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

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

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

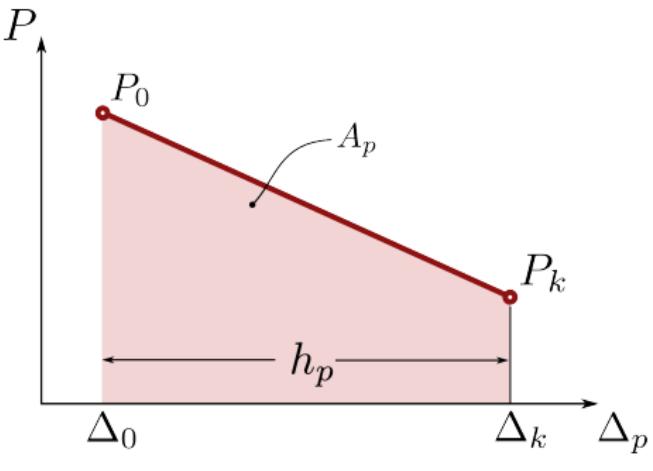
Работа толкателей



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} :

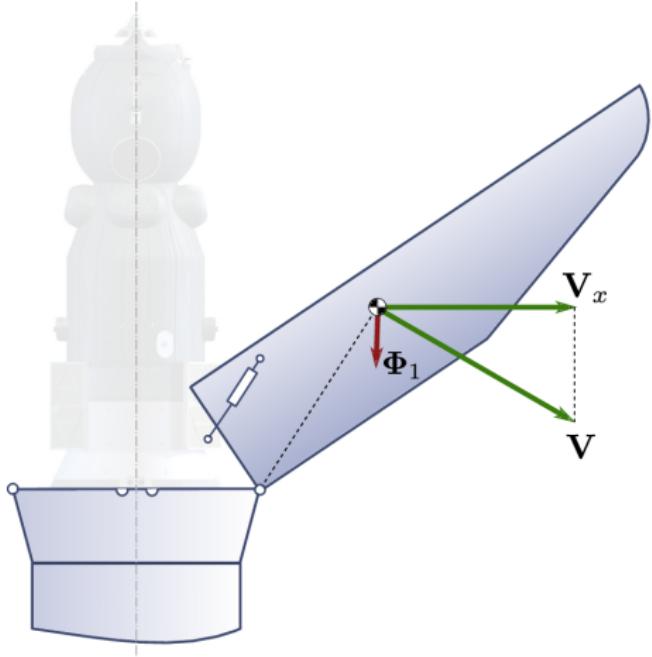
$$\sum A_p > A_{0v}. \quad (4)$$

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.

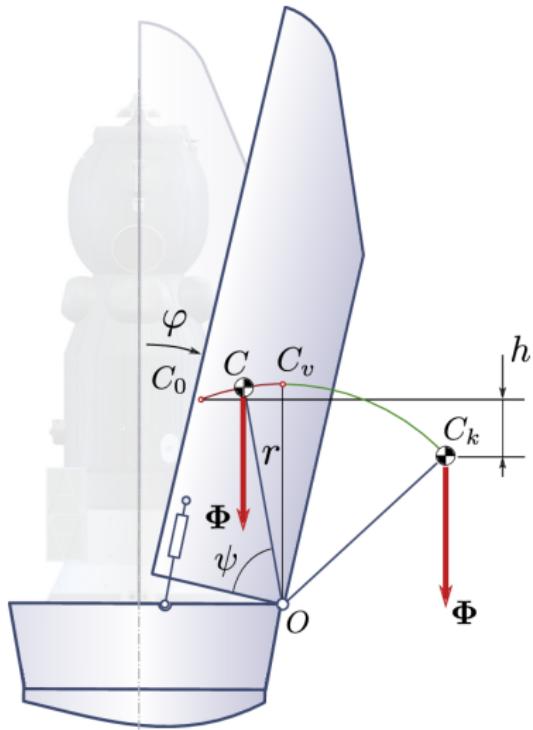
Подставляя (9) в (8)

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

получим выражение для угловой скорости створки:

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

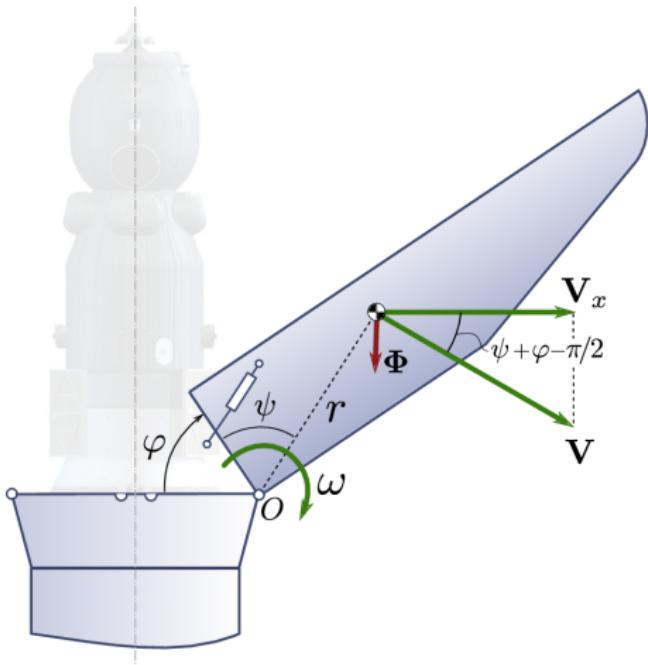
Работа переносной силы инерции



Работа переносной силы инерции Φ при перемещении центра масс створки из положения C_0 в положение C_k

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

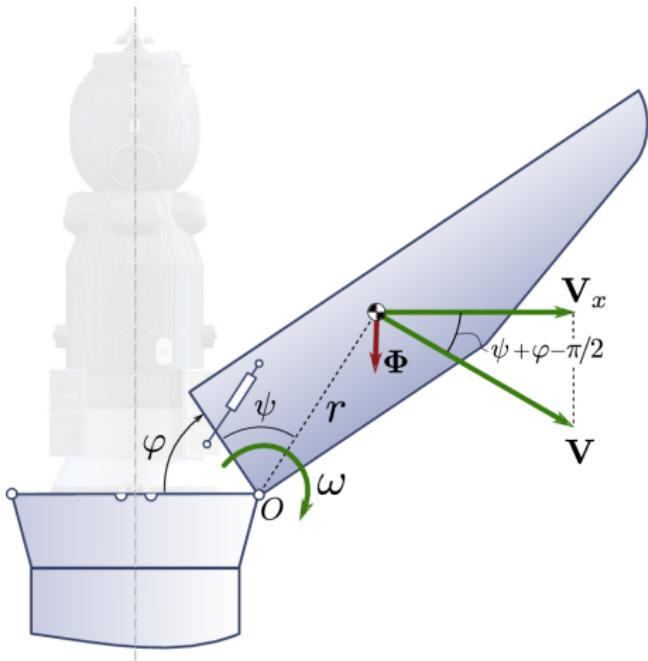
Скорость створки



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

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

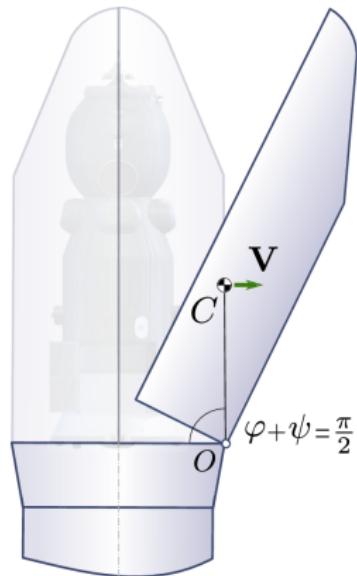
Учитывая, что

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

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 $\psi + \varphi > \pi/2$:

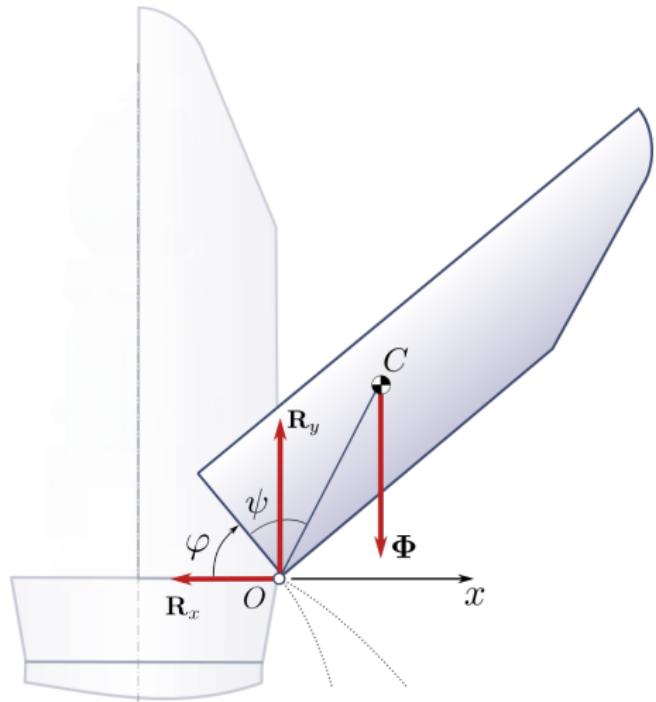
$$\boxed{\varphi = \pi - \arcsin \frac{2}{3} \left(\frac{A_p}{mgn_x r} + \sin \psi \right) - \psi}$$

Пример

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

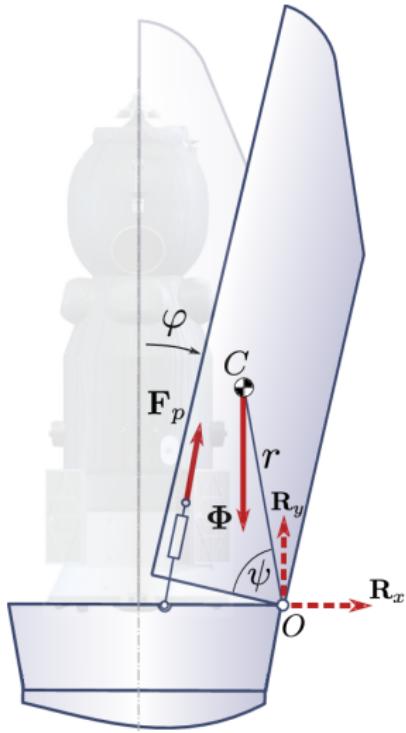
Для $m = 700$ кг, $g = 9.807$ м/с², $n_x = 1$, $r = 5$ м, $A_p = 7500$ Дж, $\psi = 75^\circ$
 $\Rightarrow \varphi = 53^\circ$

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



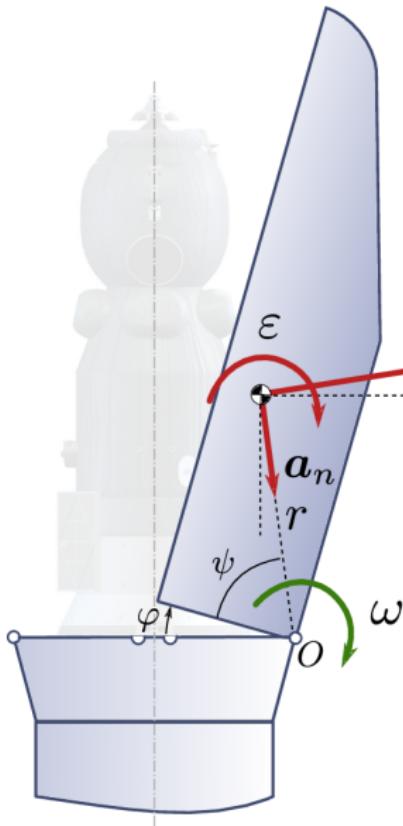
Для определения реакции R_x запишем уравнения движения створки после окончания работы толкателей:

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

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

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

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_τ – 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.