



57-я научная конференция МФТИ,
посвященная 120-летию
со дня рождения П.Л. Капицы
24-29 ноября 2014 года



Динамически инвариантное масштабирование параметров космических аппаратов с солнечным парусом

С.П. Трофимов

Московский физико-технический институт (МФТИ)
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

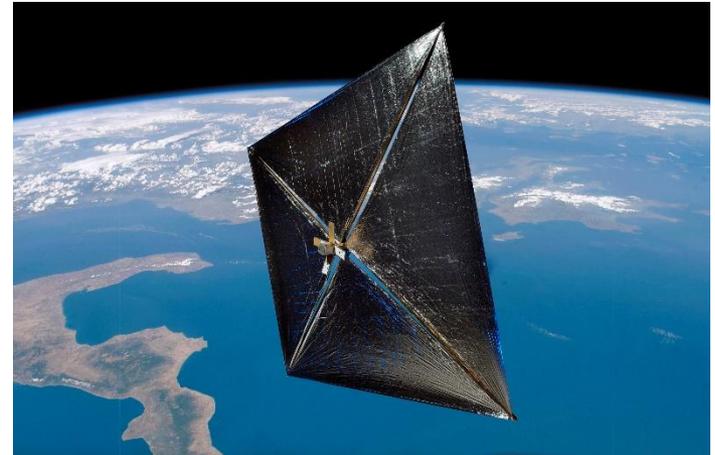
Содержание доклада

- Современное состояние технологии солнечного паруса
- Типы конструкции солнечного паруса
- Структура мембраны (полотна) паруса
- Устройство штанг и механизма развертывания паруса
- Динамические характеристики солнечных парусов
- Концепция динамически инвариантного масштабирования параметров КА и солнечного паруса
- Проблема сохранения прочности направляющих штанг при масштабировании
- Массогабаритный анализ проблемы масштабирования

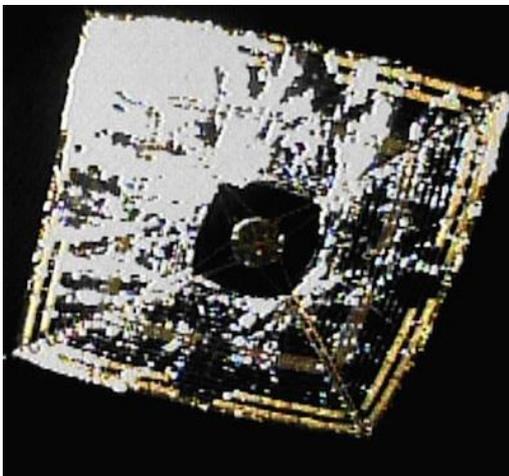
Солнечный парус: современное состояние технологии (1)

Реализованные миссии:

- **IKAROS** (2010) – полет к Венере
Масса КА 310 кг (в том числе 2 кг полотна паруса), площадь паруса 200 м²



Credit: NASA



Credit: JAXA

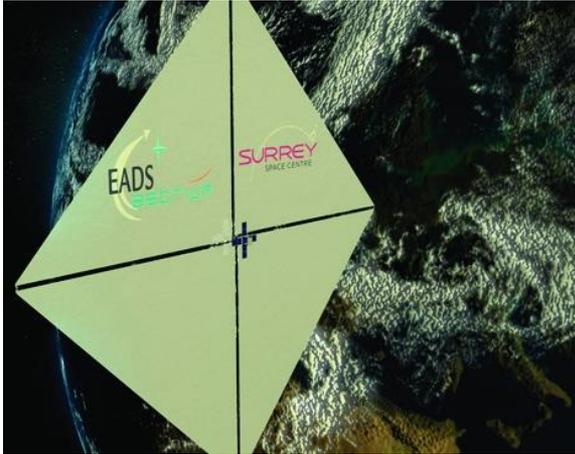
- **NanoSail-D2** (2011) – демонстрация возможностей увода
3U CubeSat массой 4 кг, площадь паруса 10 м², высота орбиты 640 км
Продолжительность увода 240 дней

Солнечный парус: современное состояние технологии (2)

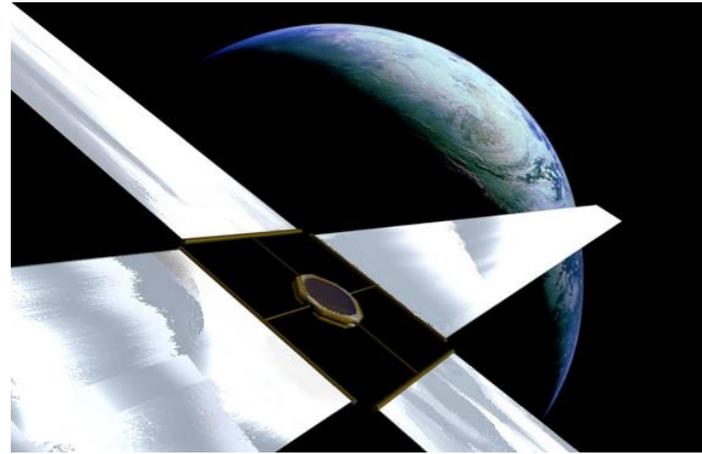
Планируемые миссии:

- **Gossamer-1** (ноябрь 2014 г.) – отработка парусной технологии
Масса КА 20 кг, площадь паруса 25 м², высота орбиты 320 км
- **CubeSail** (декабрь 2014 г.) – демонстрация возможностей паруса по уходу с орбиты и маневрированию
3U CubeSat массой 3 кг, масса паруса и механизма развертывания 1.4 кг, площадь паруса 25 м², высота орбиты 700 км
- **Sunjammer** (январь 2015 г.) – полет к точке L1 Солнце-Земля
Масса КА 178 кг, масса паруса и механизма развертывания 50 кг, площадь паруса 1428 м²
- **LightSail-1** (2015-2016 гг.) – демонстрация возможностей паруса по уходу с орбиты и маневрированию
3U CubeSat массой 4.6 кг, масса паруса и механизма развертывания 2.8 кг, площадь паруса 32 м², высота орбиты 720 км

Типы конструкции солнечного паруса



Credit: Surrey Space Centre



Credit: R. Blomquist



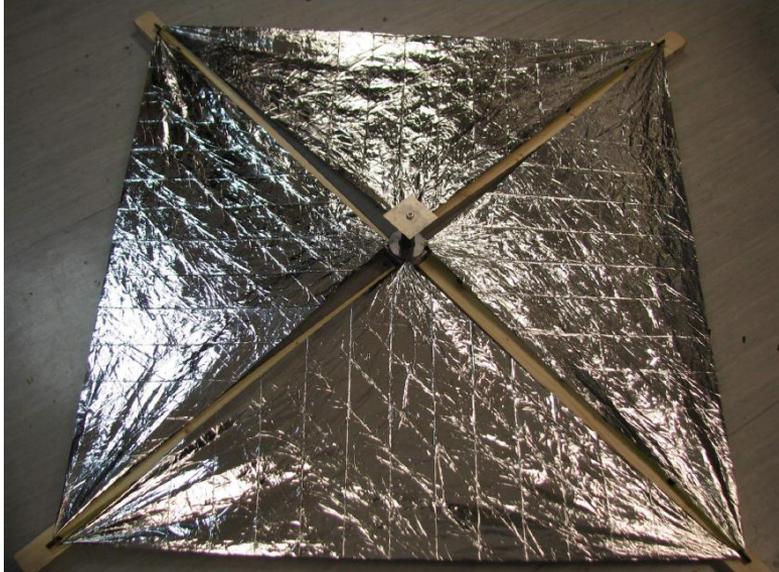
Credit: B. Diedrich

Некоторые типы парусов:

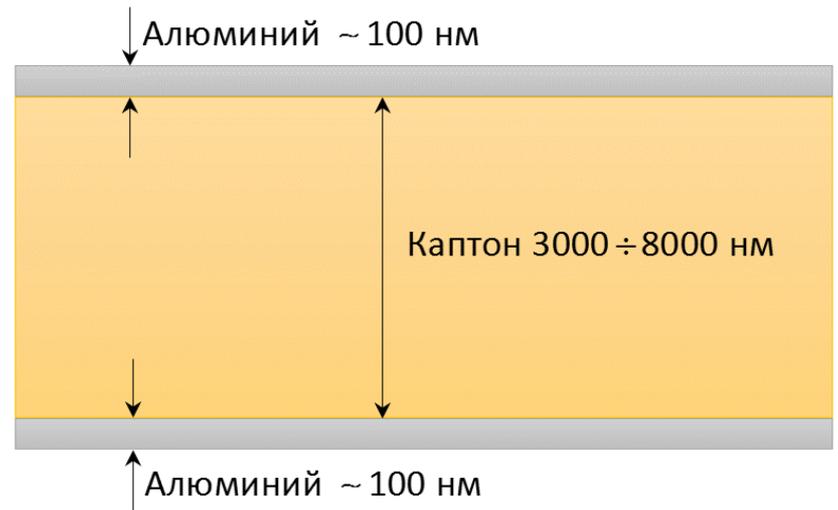
1. Квадратный
2. Парус-диск
3. Парус-гироскоп

Структура мембраны паруса

- Основа мембраны паруса – легкий композитный материал (каптон или майлар)
- Передняя поверхность паруса покрывается хорошо отражающей свет алюминиевой пленкой



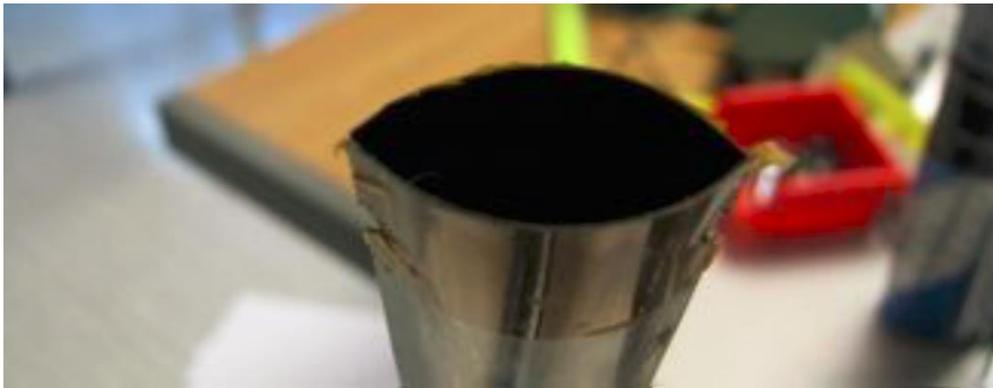
Credit: V. Lappas, Surrey Space Centre



- Задняя поверхность паруса должна хорошо излучать и поэтому хромируется либо также алюминировается (если неизвестно, какая из сторон будет рабочей)

Типы направляющих штанг

Металлические
(например, медно-бериллиевые)

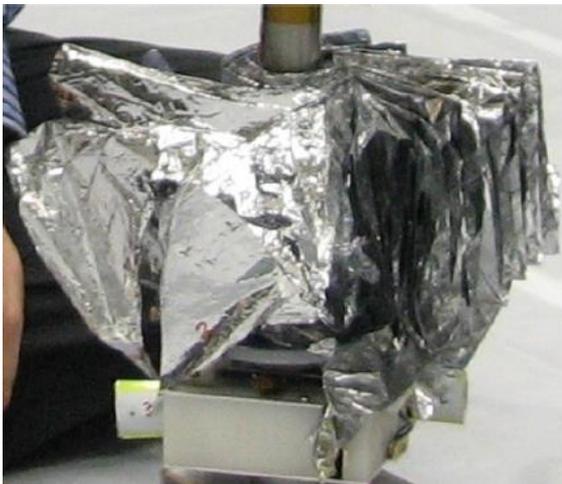
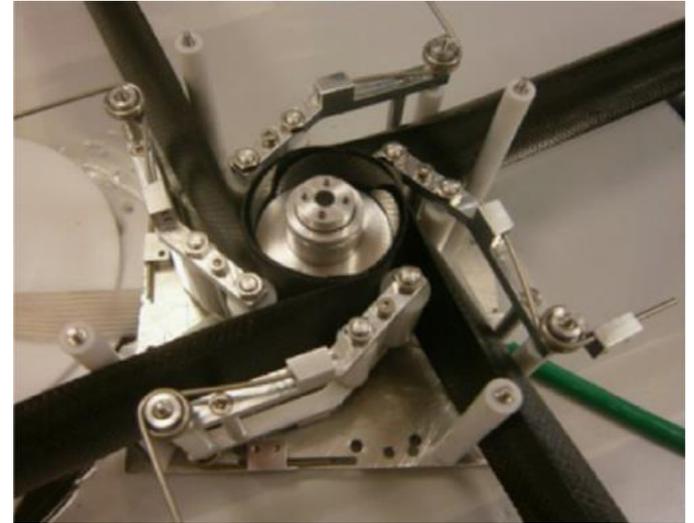


Углепластиковые



Credit: V. Lappas and his colleagues at Surrey Space Centre

Механизм разворачивания паруса



Credit: V. Lappas and his colleagues at Surrey Space Centre

Динамические характеристики солнечных парусов

$$\sigma = \frac{m_{KA}}{A} \text{ – нагрузка паруса} \quad m_{KA} = m_{\text{мех}} + m_{\text{мем}} + m_{\text{шт}} + m_{\text{пол}}$$

$$\sigma_a = \frac{m_{\text{мех}} + m_{\text{мем}} + m_{\text{шт}}}{A} \text{ – компоновочная нагрузка паруса}$$

$$a_c = \frac{2\eta P}{\sigma} \text{ – характеристическое ускорение } (\eta = 1 \text{ для зеркально отражающего паруса})$$

$$P = \frac{W}{c} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2 c} \left(\approx 4.56 \cdot 10^{-6} \text{ Па для 1 а.е.} \right)$$

$$L_{\odot} \approx 4\pi R_{\odot}^2 \cdot \sigma T_{\odot}^4 \approx 3.85 \cdot 10^{26} \text{ Дж/с – светимость Солнца}$$

$$\beta = \frac{\sigma_*}{\sigma} = \frac{L_{\odot}}{2\pi c G M_{\odot} \sigma} \text{ – легкость паруса (при } \sigma = \sigma_* \text{ } a_c = g \text{)}$$

Масштабирование параметров КА и солнечного паруса

Вся совокупность наземных и летных испытаний проводится для небольшого по размеру паруса или даже его прототипа.

Может потребоваться его адаптация к более массивному КА

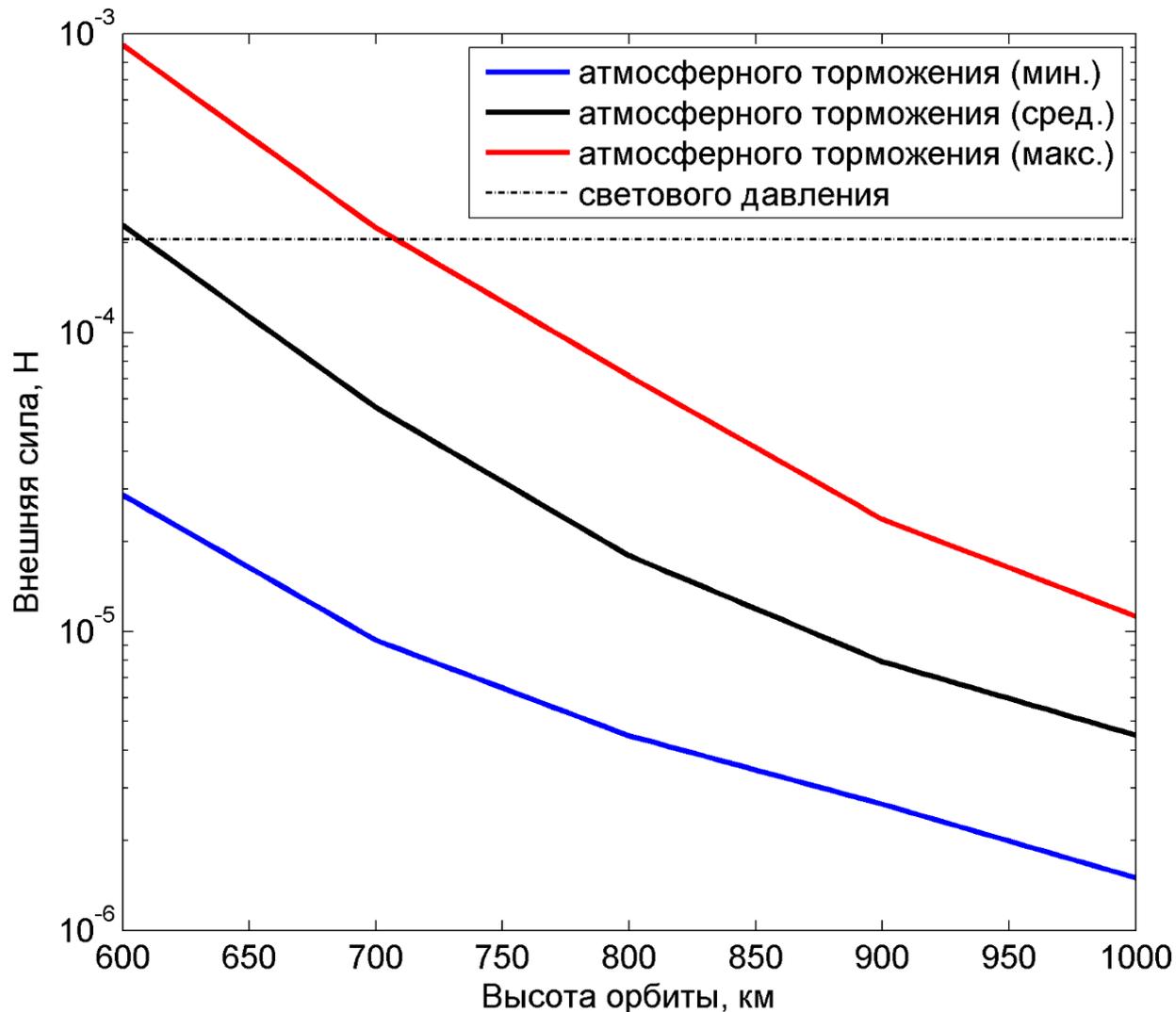
Динамически инвариантное масштабирование – изменение массовых и габаритных параметров КА и солнечного паруса, сохраняющее отношение площадь-масса (и, следовательно, нагрузку паруса)

$$m_{КА} \rightarrow k^2 m_{КА} \quad A \rightarrow k^2 A$$

$$m_{мем} \rightarrow k^2 m_{мем} \quad m_{мех} \approx \text{const}$$

$$m_{шт} \rightarrow ? \quad m_{пол} \rightarrow ?$$

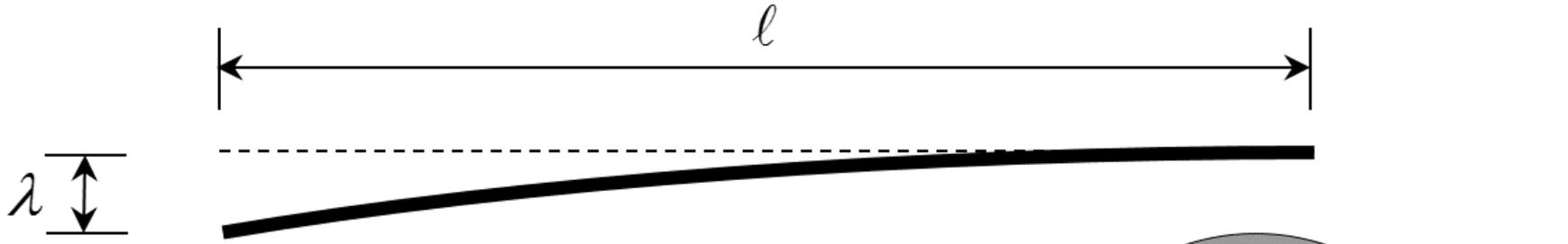
Силы, действующие на парус на низкой околоземной орбите



Приведены максимальные значения сил атмосферного торможения и светового давления для КА с парусом площадью 25 м^2

Коэффициент лобового сопротивления $C_D=2.2$

Изгиб штанги как функция длины



λ – стрела прогиба

$$\lambda = \frac{l^3}{EI} \kappa F, \quad E \text{ – модуль Юнга}$$

$\kappa \leq \frac{1}{3}$ – коэффициент, задающий распределение нагрузки F вдоль штанги

$I = \pi \rho^3 \tau$ – момент инерции поперечного сечения штанги

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l} = \frac{l^2}{E \pi \rho^3 \tau} \kappa F \propto \frac{l^4}{\rho^3 \tau} \quad \text{поскольку } F \propto l^2$$

Масштабирование с сохранением прочностных свойств штанг паруса

Требование сохранения величины относительного изгиба штанги ведет к необходимости увеличения радиуса и/или толщины штанги

Масштабируемость толщины штанги почти отсутствует из-за превышения предела текучести штанги при изгибе

$$\tau / 2r_{кат} \leq \sigma_s \Rightarrow \tau \approx \text{const}$$

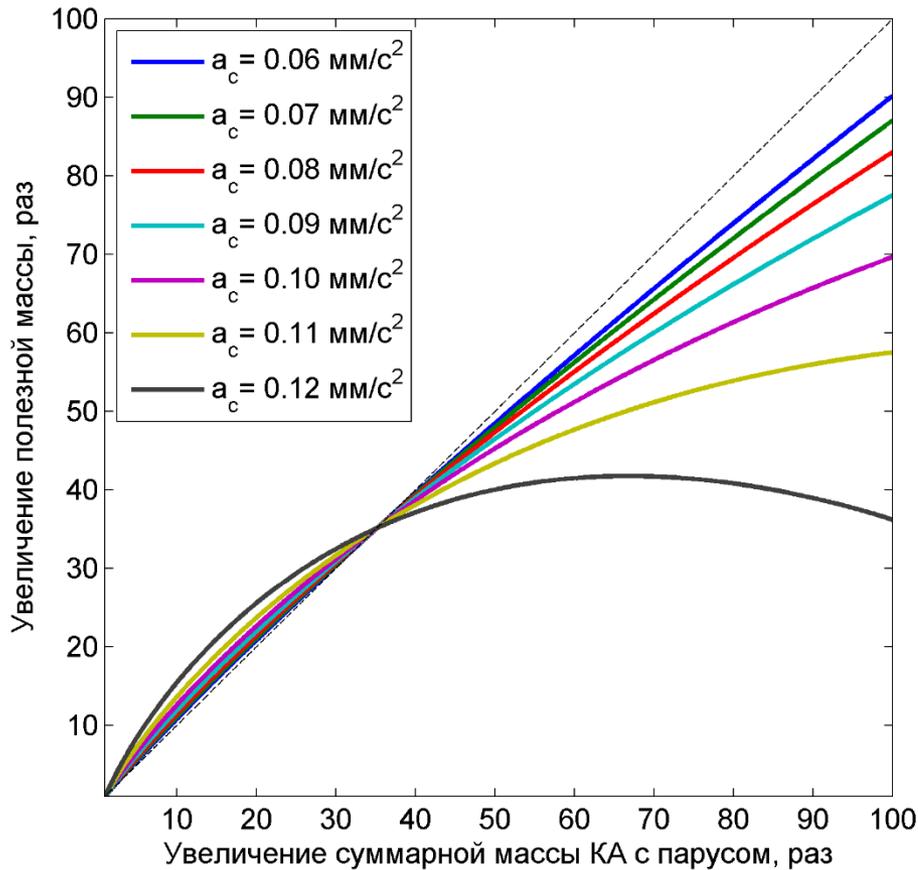
$$\varepsilon = \text{const} \Rightarrow l^4 \propto \rho^3$$

$$m_{ум} \propto \rho \tau l \propto l^{7/3} \Rightarrow m_{ум} \rightarrow k^{7/3} m_{ум}$$



Credit: V. Lappas, Surrey Space Centre

Масштабируемость полезной массы



Прототип КА с парусом – 3U кубсат CubeSail:

$$m_{КА} = 3 \text{ кг} \quad m_{мех} = 0.5 \text{ кг} \quad m_{мем} = 0.3 \text{ кг} \quad m_{шт} = 0.6 \text{ кг}$$

$$\frac{m_{мех} + k^2 m_{мем} + k^{7/3} m_{шт} + \bar{m}_{пол}}{m_{мех} + m_{мем} + m_{шт} + m_{пол}} = k^2$$

$$\frac{\bar{m}_{пол}}{m_{пол}} = k^2 \left[1 + \frac{m_{мех} (1 - k^{-2}) - (k^{1/3} - 1) m_{шт}}{m_{пол}} \right]$$

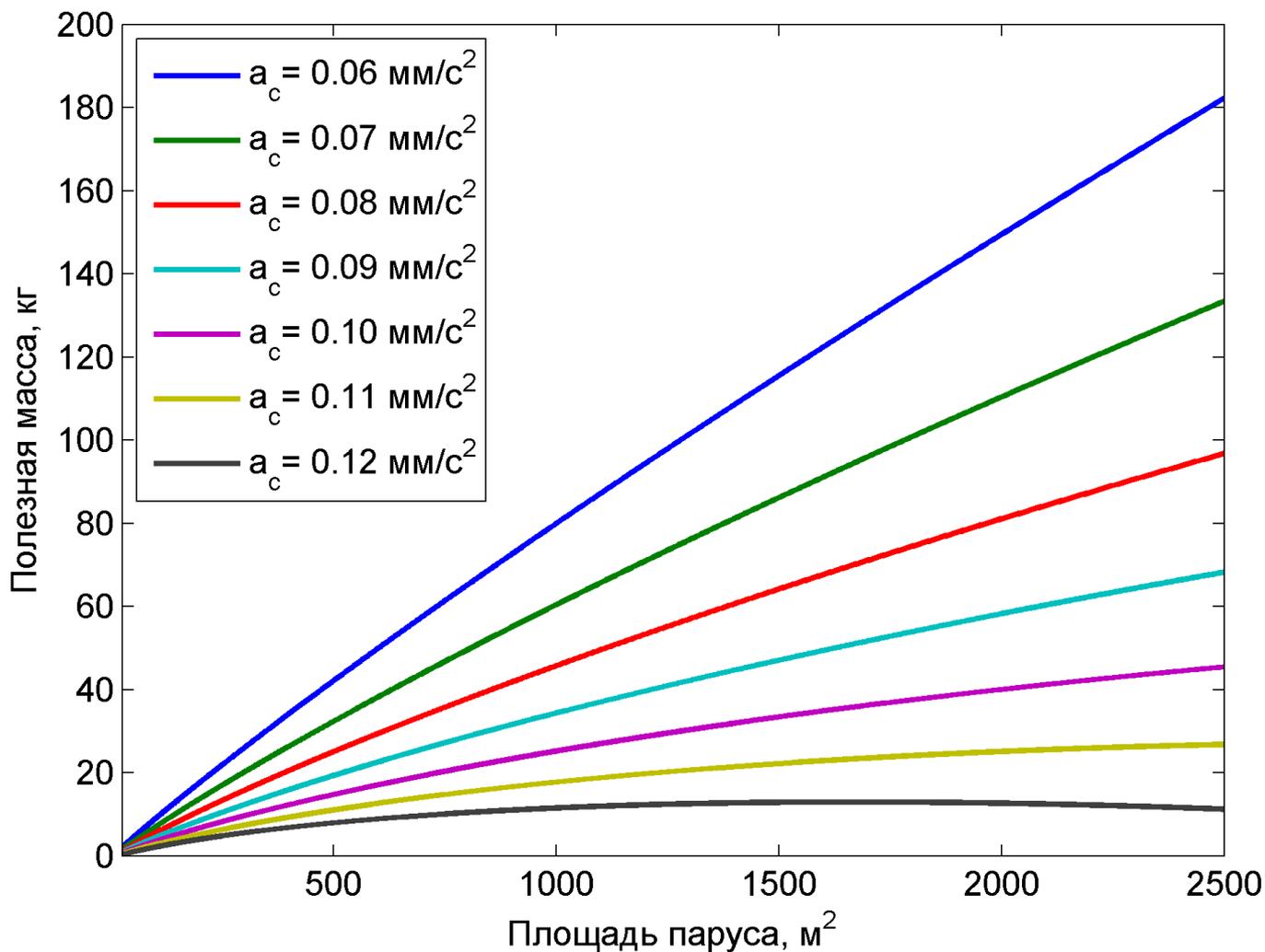
$$m_{пол} = \frac{2\eta PA}{a_c} - m_{мех} - m_{мем} - m_{шт}$$

$$\frac{\bar{m}_{пол}}{m_{пол}} = k_*^2 \text{ независимо от } a_c \text{ при условии}$$

$$\frac{m_{мех}}{m_{шт}} = \frac{(k_*^{1/3} - 1) k_*^2}{k_*^2 - 1}$$

$$\frac{\bar{m}_{пол}}{m_{пол}} > k^2 \text{ при } k < k_*, \quad \frac{\bar{m}_{пол}}{m_{пол}} < k^2 \text{ при } k > k_*$$

Полезная масса как функция площади солнечного паруса



Прототип КА с парусом
– 3U кубсат CubeSail:

$$A = 25 \text{ м}^2$$

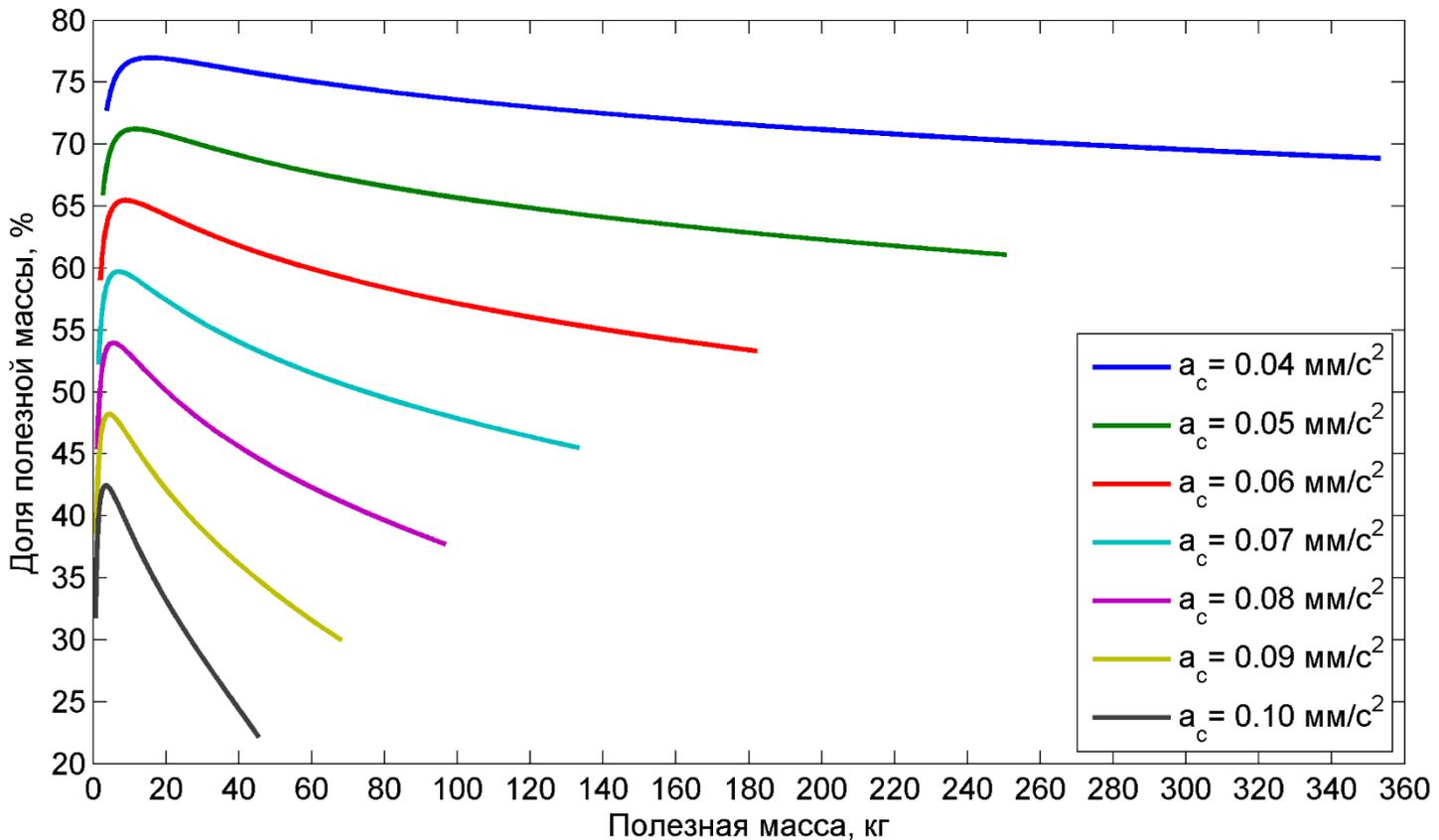
$$m_{КА} = 3 \text{ кг}$$

$$m_{мех} = 0.5 \text{ кг}$$

$$m_{мем} = 0.3 \text{ кг}$$

$$m_{шт} = 0.6 \text{ кг}$$

Доля полезной массы как функция полезной массы

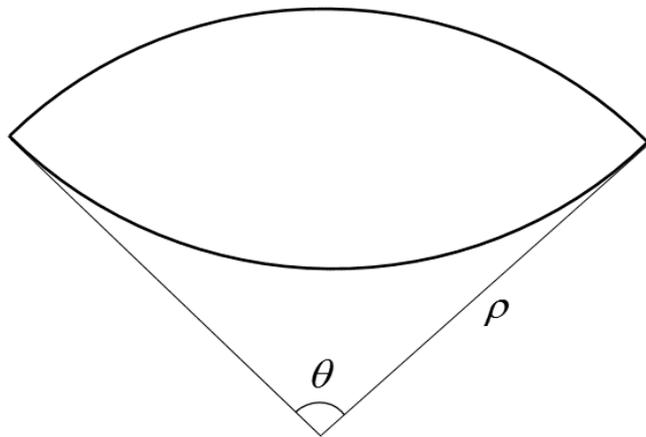


Прототип КА с парусом – 3У кубсат CubeSail: $A = 25 \text{ м}^2$

$m_{КА} = 3 \text{ кг}$ $m_{мех} = 0.5 \text{ кг}$ $m_{мем} = 0.3 \text{ кг}$ $m_{итт} = 0.6 \text{ кг}$

Масштабирование габаритных параметров неразвернутых штанг

$$h = \theta \rho - \text{высота рулона неразвернутых штанг} \Rightarrow h \propto \ell^{4/3}$$



При умеренном масштабировании надо учитывать изменение угла θ , которое может быть использовано для увеличения момента инерции поперечного сечения штанги

$$r = \sqrt{\frac{4\tau\ell}{\pi} + r_{кат}^2} - \text{радиус рулона неразвернутых штанг}$$

(в предположении архимедовой намотки штанг на катушку)

Заключение

- Рассмотрена проблема динамически инвариантного масштабирования квадратного солнечного паруса
- Из требования сохранения прочностных свойств направляющих штанг получена асимптотическая зависимость их массы от длины
- Как следствие, выведен закон масштабируемости полезной массы. Так как масса штанг растет чуть быстрее площади паруса, найденный закон масштабируемости полезной массы имеет немонотонный характер
- В результате для конкретного прототипа паруса существует предельная полезная масса, которая может быть достигнута при масштабировании
- Для ряда значений характеристического ускорения построены графики зависимости полезной массы от площади паруса. Показано поведение доли полезной массы (от полной массы КА) при росте полезной массы

Благодарности

Российский научный фонд (РНФ), грант № 14-11-00621

Спасибо за внимание!