



# ДИССЕРТАЦИЯ на соискание академической степени МАГИСТРА

Статические и динамические конечно-  
элементные расчёты защитного устройства  
диагностики токамака ITER

Направление: 150300 – Прикладная механика

Магистерская программа: 150303 – Вычислительная механика

Выполнил студент группы 6055/11

Ховайко М. В.

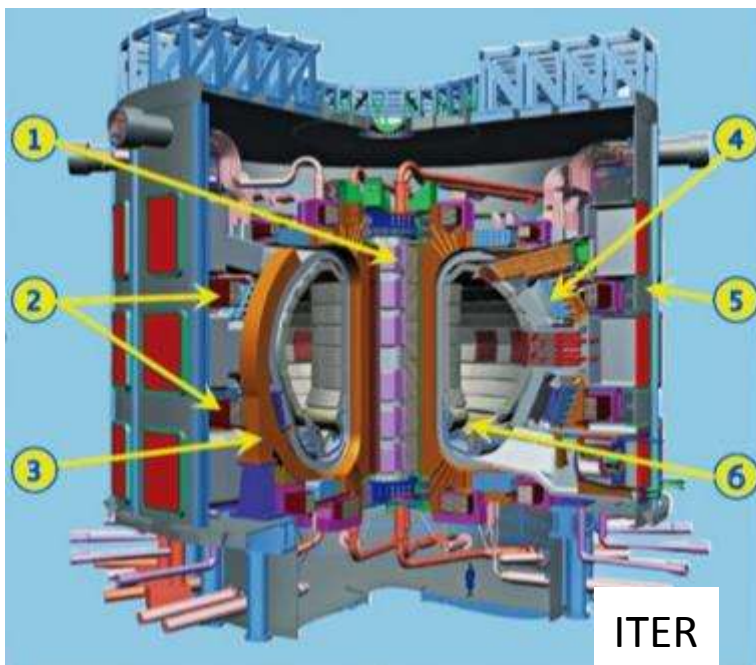
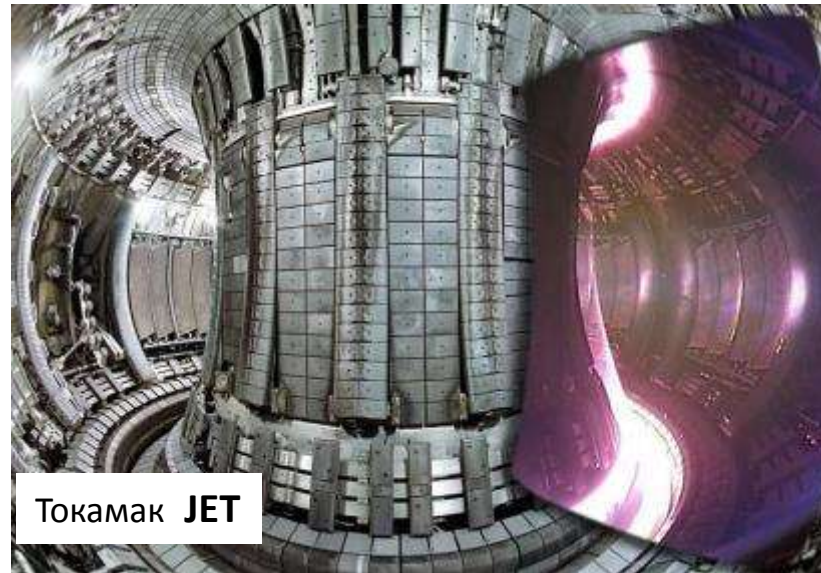
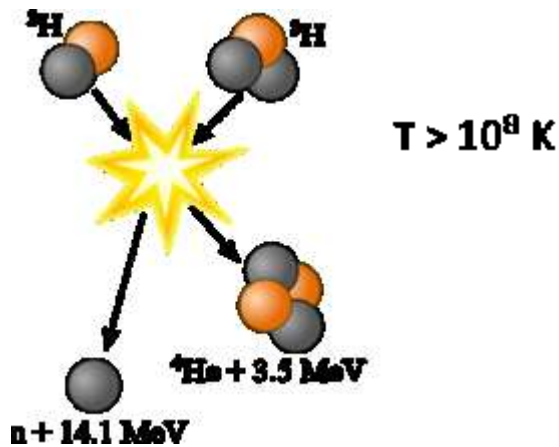
Руководитель, к. т. н., проф.

Боровков А. И.

Соруководитель, асс.

Немов А. С.

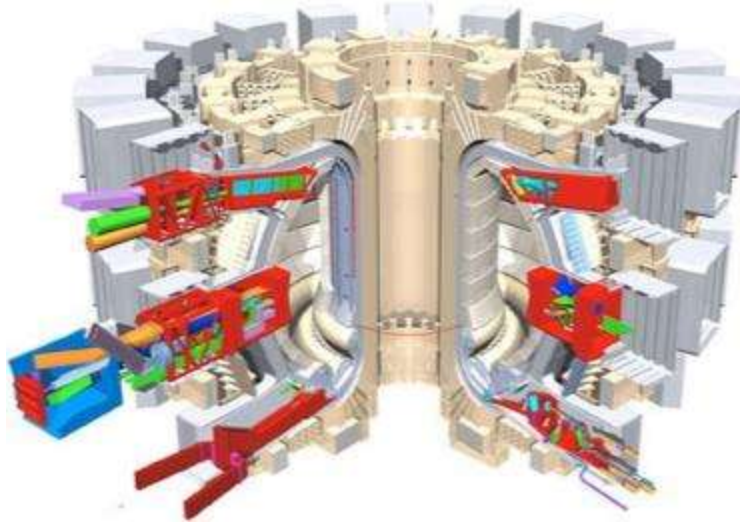
## Управляемый термоядерный синтез



### Схема токамака ITER:

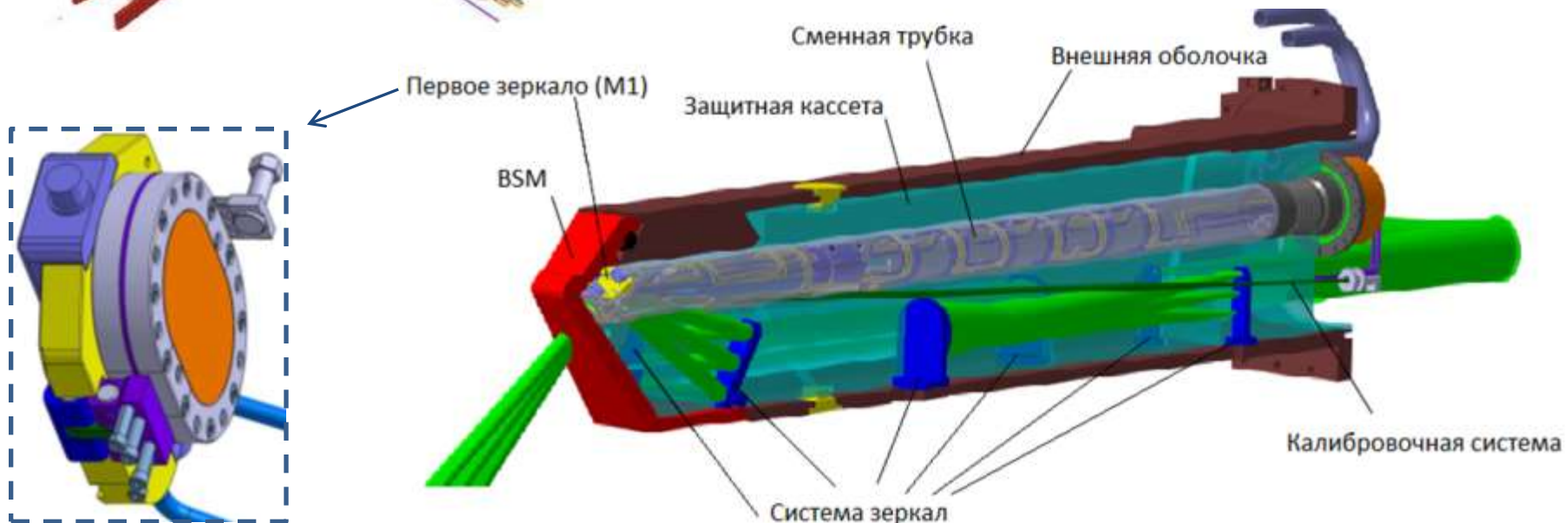
1. центральный соленоид (индуктор)
2. катушки полоидального магнитного пол
3. катушка тороидального магнитного поля
4. вакуумная камера
5. криостат
6. дивертор

# Спектроскопия CXRS

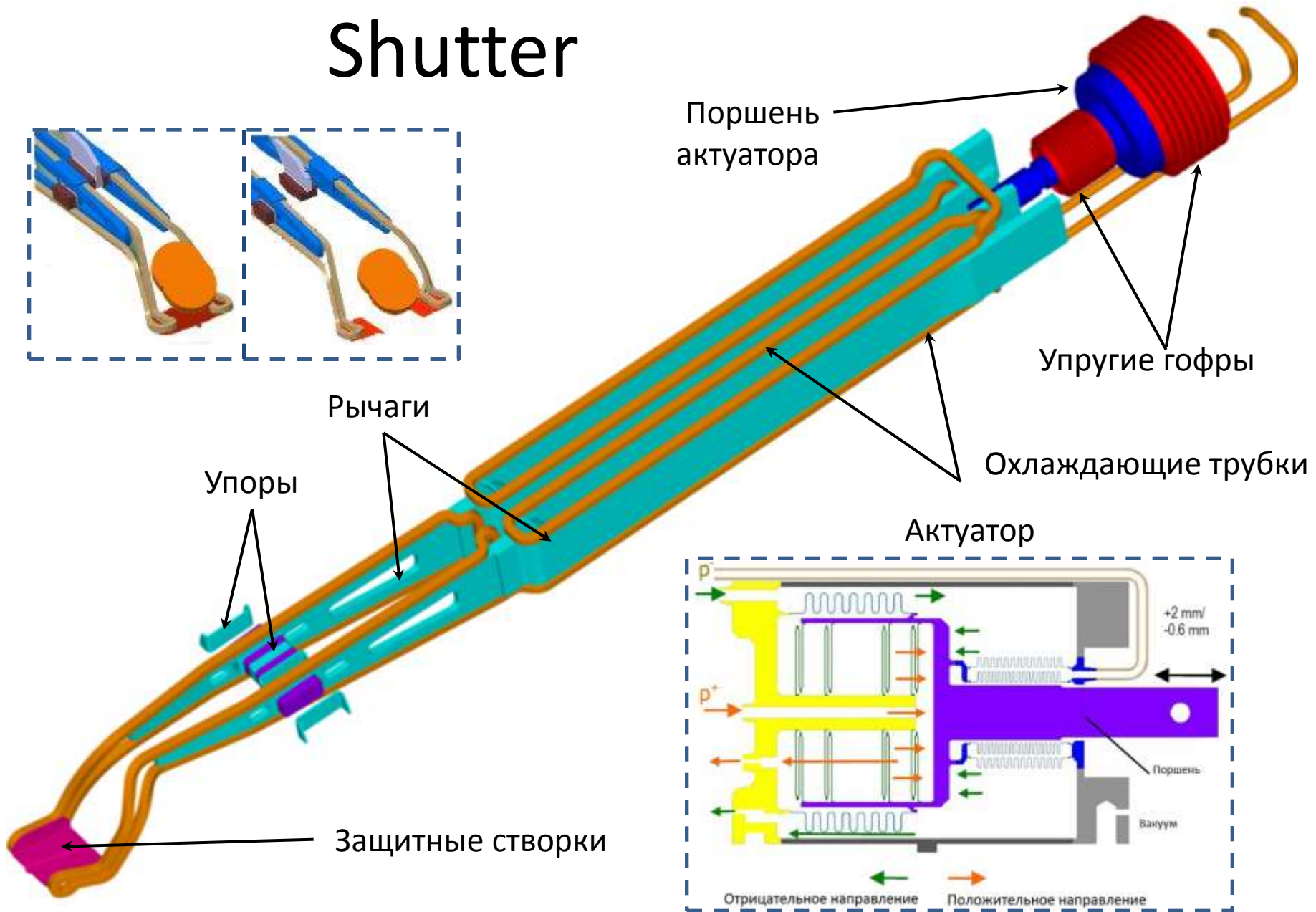


Более 50 отдельных систем  
токамака будут использованы  
для диагностики и  
дальнейшего изучения  
плазмы

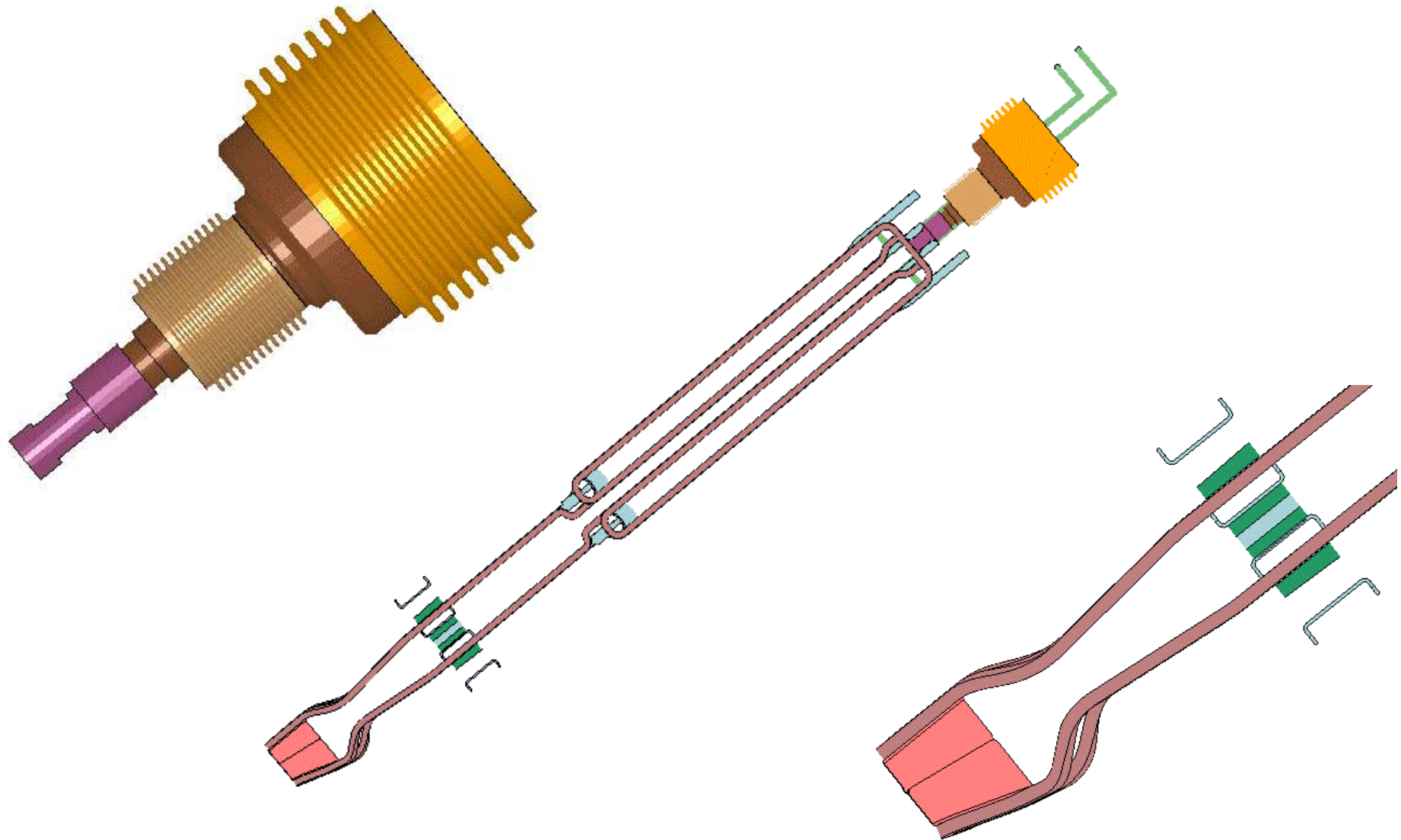
Система диагностики core CXRS



# Shutter



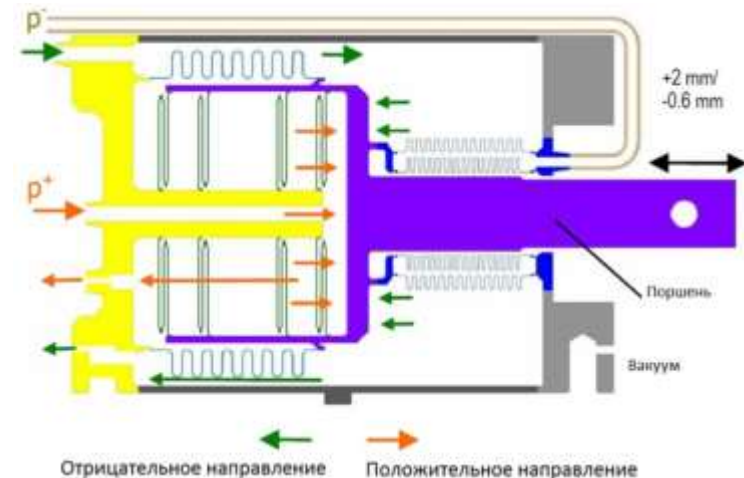
# Принцип работы Shutter



# Статические расчёты

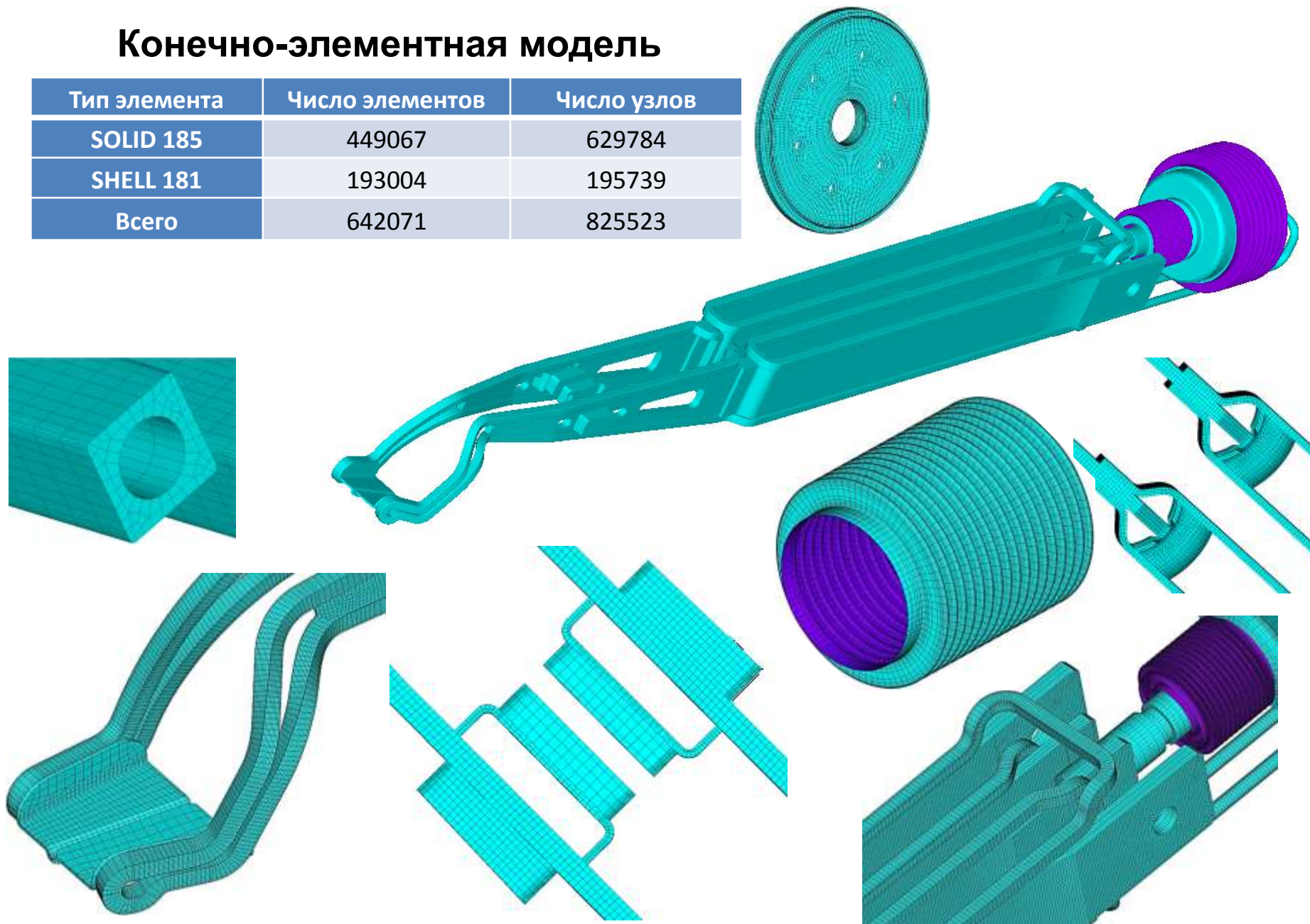
## Основные задачи

- Определить соотношение давлений  $P_+$  и  $P_-$ , при котором происходит полное раскрытие створок (соприкосновение с внешними упорами).
- Определить области соприкосновения при контактных взаимодействиях в упорах и максимальные контактные давления.
- Выявить области максимальных эквивалентных напряжений.

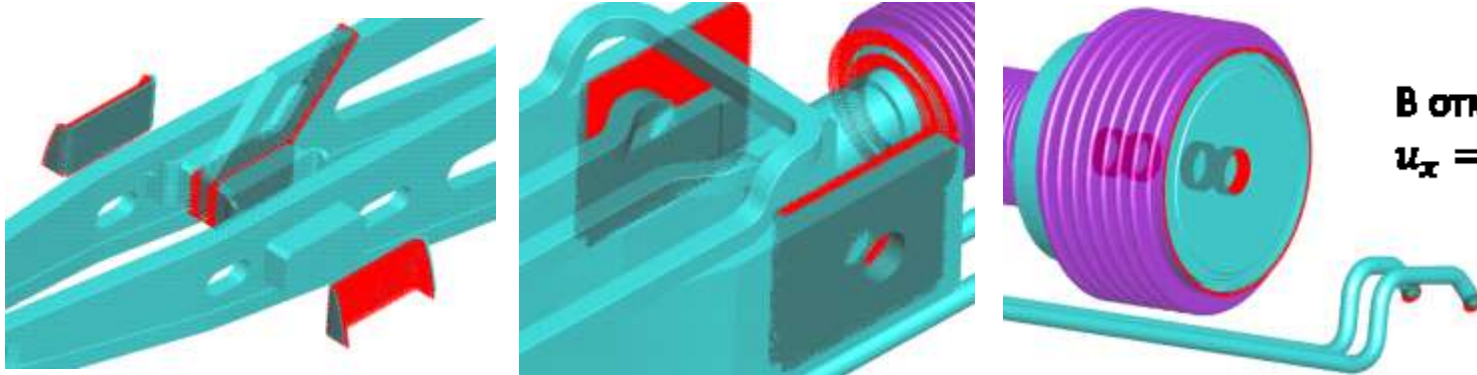


## Конечно-элементная модель

Тип элемента	Число элементов	Число узлов
SOLID 185	449067	629784
SHELL 181	193004	195739
Всего	642071	825523



## Граничные условия, нагрузки



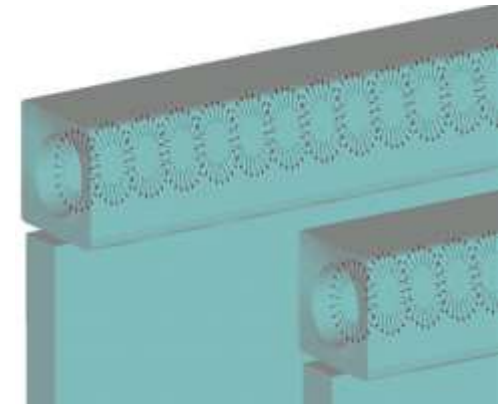
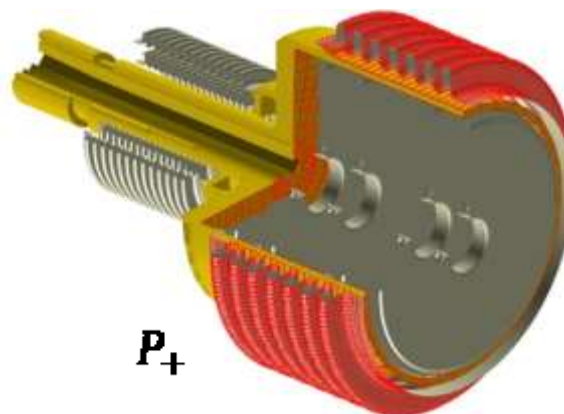
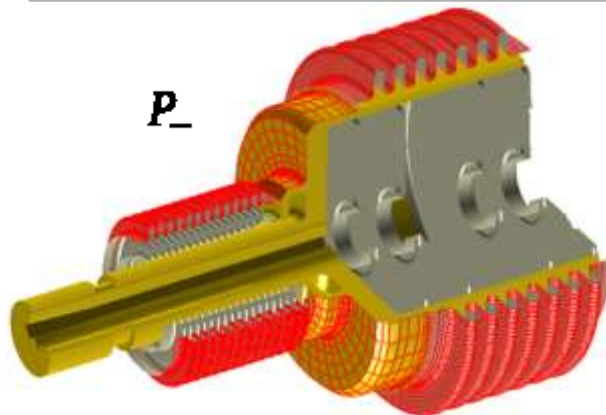
В отмеченных узлах:  
 $u_x = u_y = u_z = 0$



Направление силы тяжести

Области приложения давлений

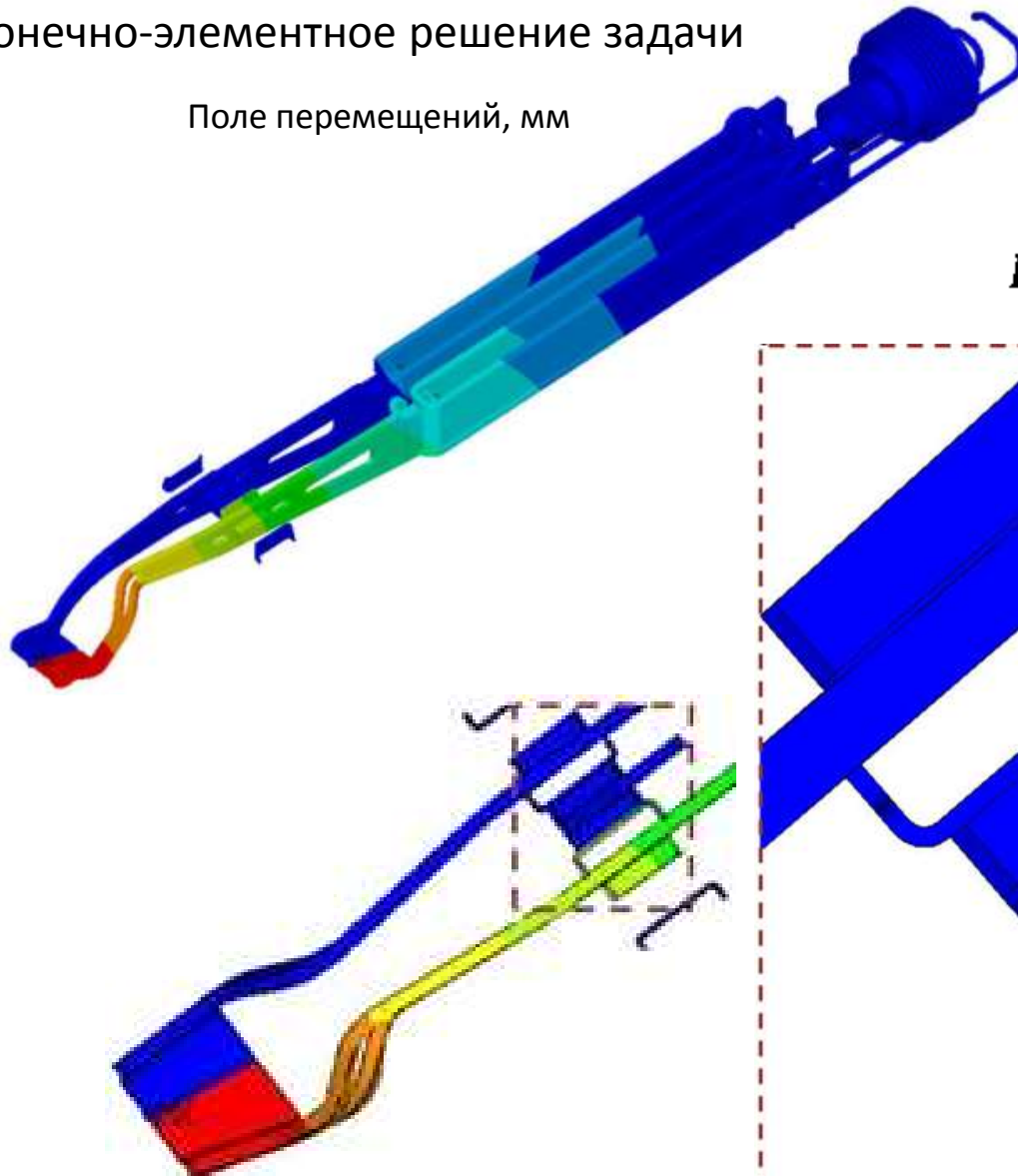
Давление внутри охлаждающей трубки 3 МПа



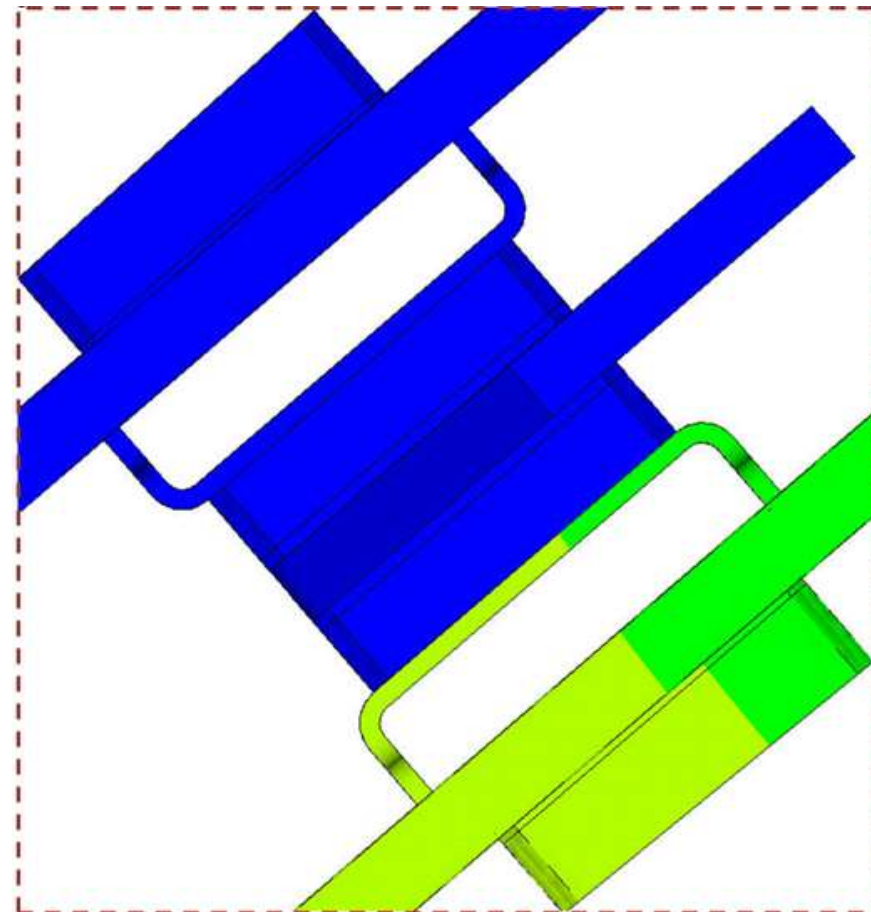


# Конечно-элементное решение задачи

Поле перемещений, мм



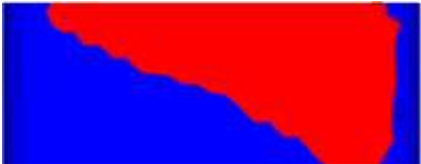


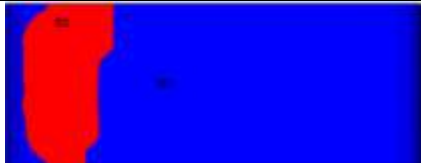

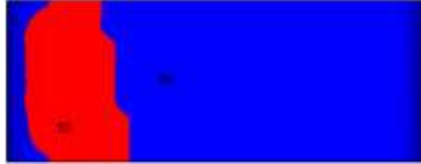
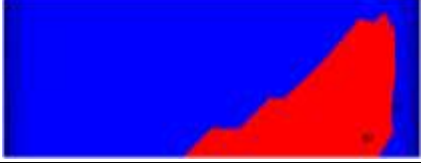
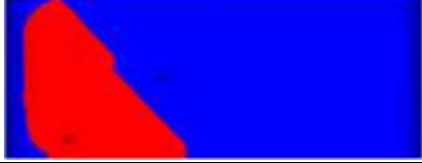
$P_+ = 39 \text{ кПа}$      $P_+ = 50 \text{ кПа}$



Конечно-элементное решение задачи

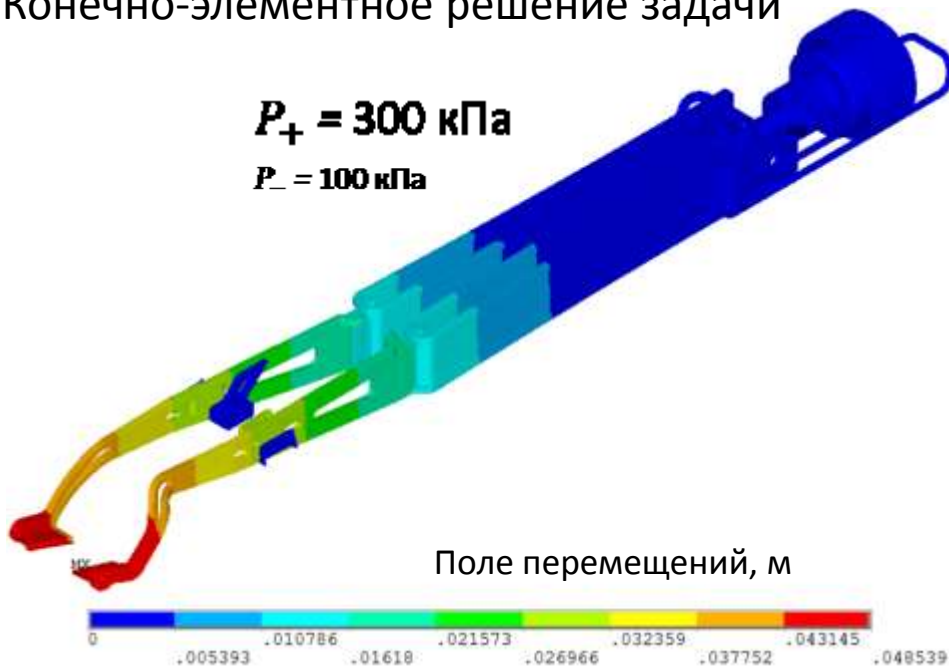
Контактные давления

$P_+ = 39 \text{ кПа}$

$P_+$ , кПа	Левый упор		Правый упор	
	Область соприкосновения	Максимальное контактное давление, кПа	Область соприкосновения	Максимальное контактное давление, кПа
50		320		260
100		350		370
150		450		440
250		890		860

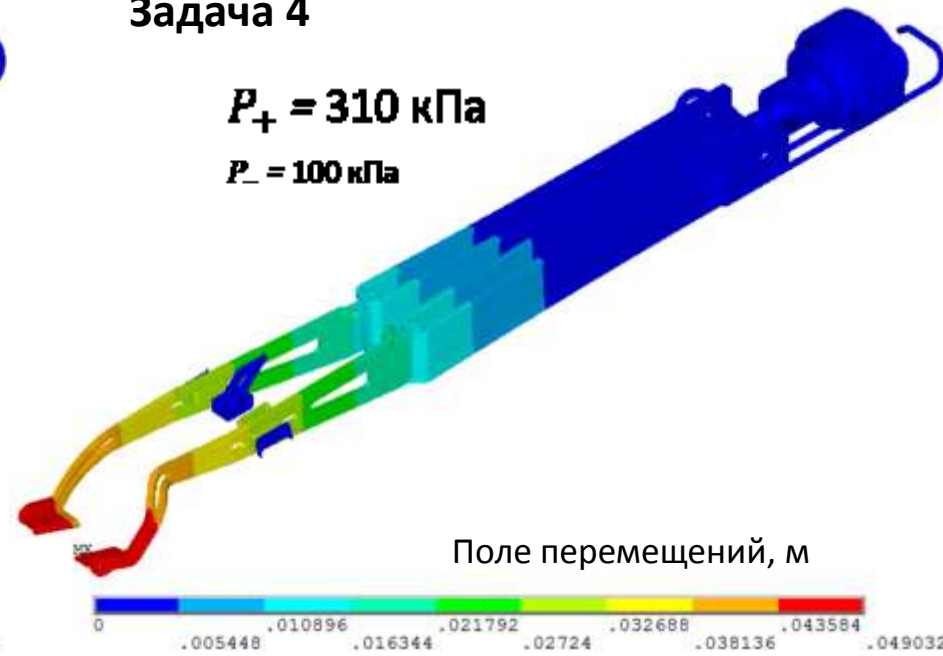
## Конечно-элементное решение задачи

$P_+ = 300$  кПа  
 $P_- = 100$  кПа

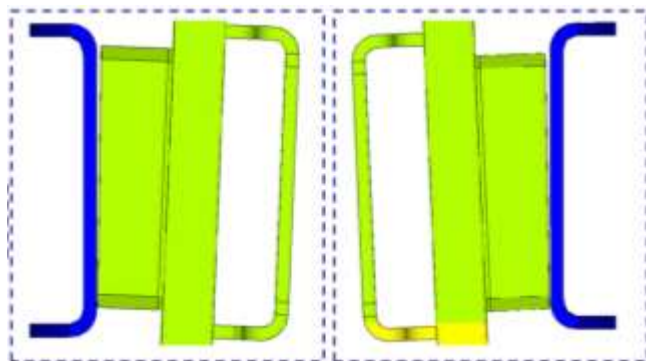


## Задача 4

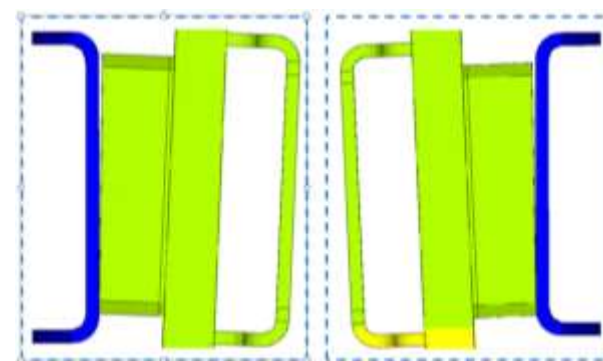
$P_+ = 310$  кПа  
 $P_- = 100$  кПа



Контактное давление, кПа

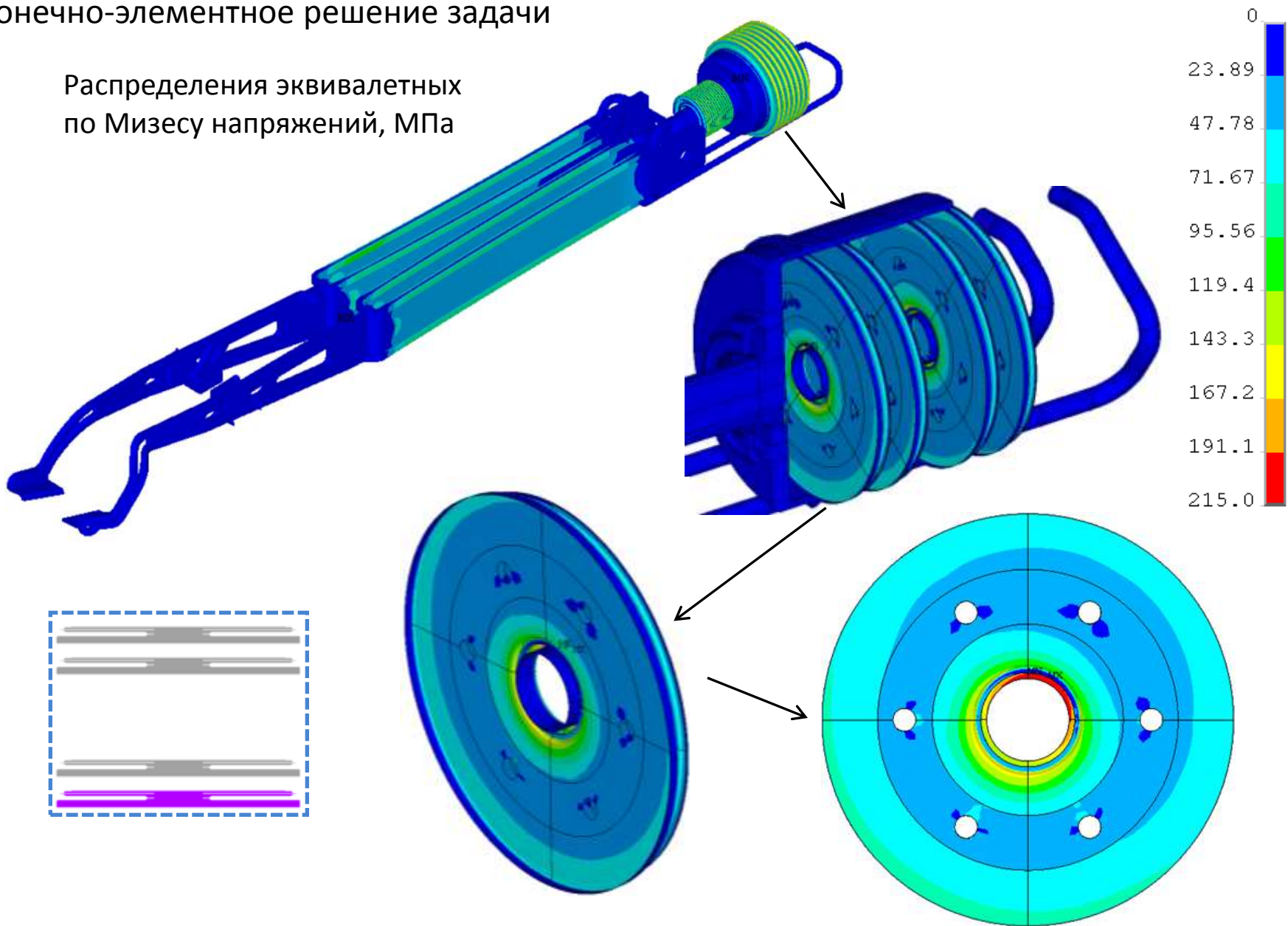


Контактное давление, кПа



## Конечно-элементное решение задачи

Распределения эквивалентных по Мизесу напряжений, МПа



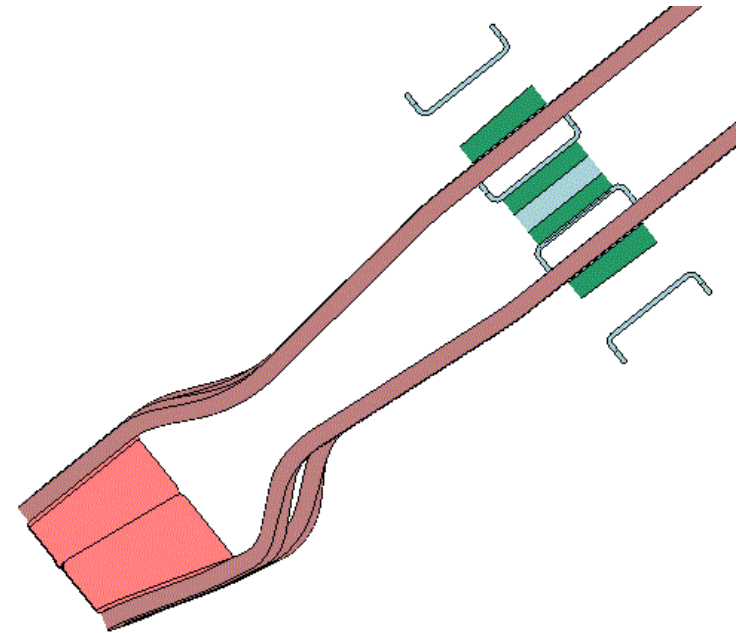


## Динамические расчёты Shutter

# Основные задачи

- Определить время раскрытия створок при заданных значениях давления внутри актуатора.
- Исследовать колебания створок после удара.

Колебания, возникающие при ударе рычагов о внешние упоры, являются одной из самых серьёзных проблем при проектировании защитного устройства.



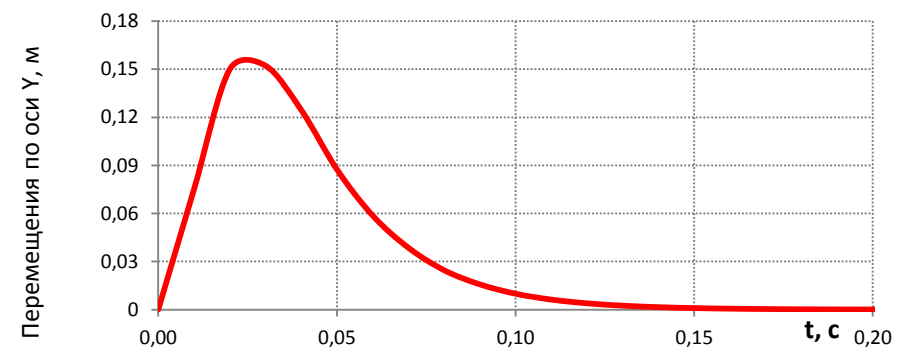
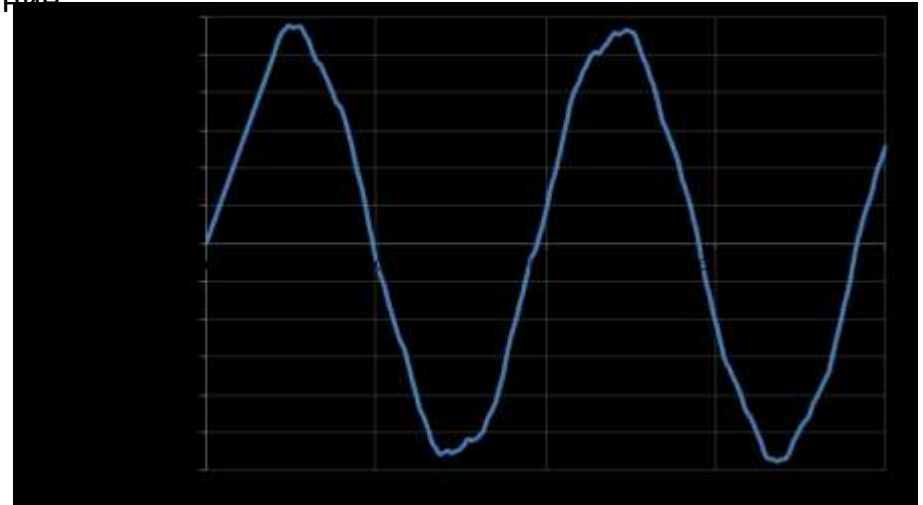
Для корректной постановки задачи необходимо учесть демпфирование

# Исследование влияния демпфирования. Модельная задача

$$\ddot{u} + 2n\dot{u} + \omega^2 u = 0$$

$$n = \omega_{min} \quad \text{Критическое демпфирование}$$

$$D_m = 2\omega_{min}v$$



# Нагрузки

$$p_+(t) = p_+^1 + (p_+^2 - p_+^1) \cdot \exp(-\zeta \omega_n t) \cdot \sin(\omega_n t)$$

$\omega_n$  — частота собственных колебаний  
 $\zeta$  — коэффициент демпфирования  
 $t_k$  — время вынуждения

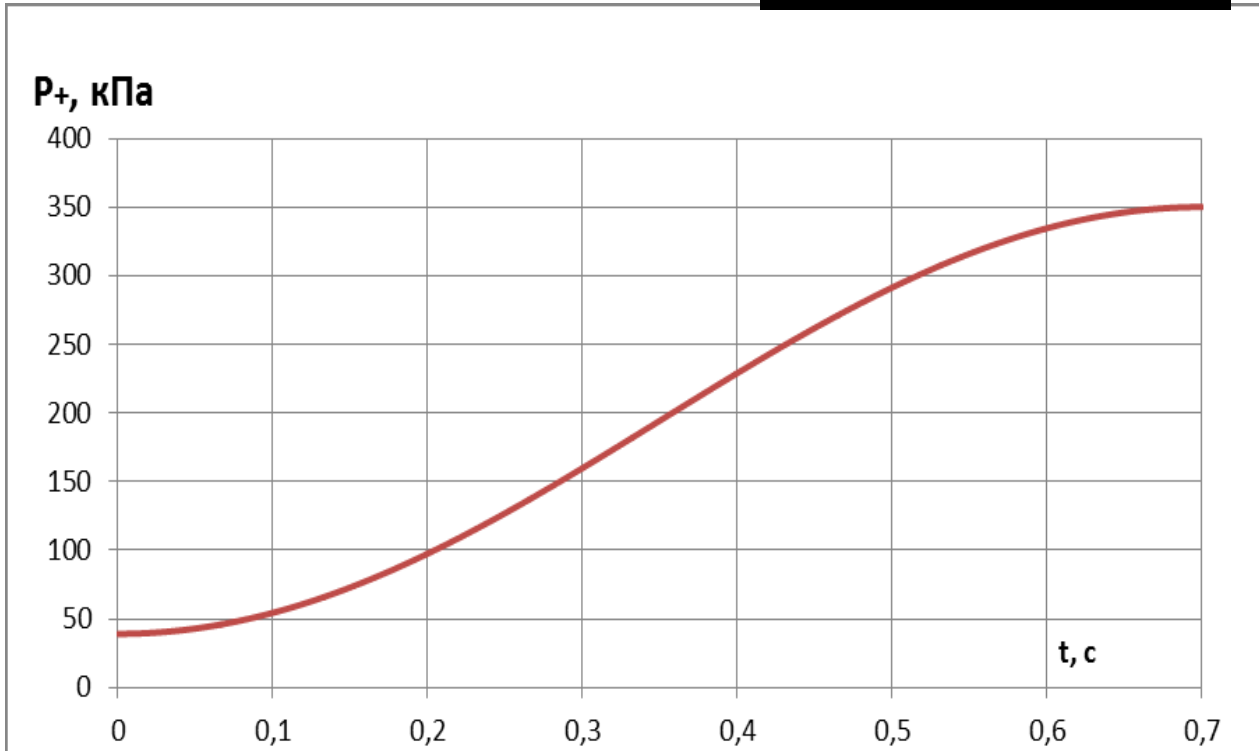
$$P_+^1 = 39 \text{ кПа}$$

$$P_+^2 = 350 \text{ кПа}$$

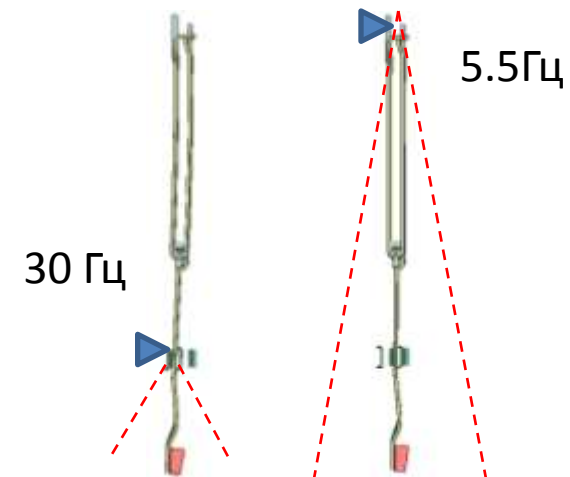
$$t_k = 0.7 \text{ с}$$

**Задача 1.** Демпфирование не введено

**Задача 2.** Вводится массовое демпфирование в величину 0.75% от критического на частоте 30 Гц. Демпфирующий коэффициент равен 2.827.

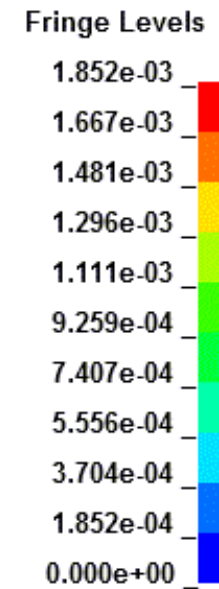
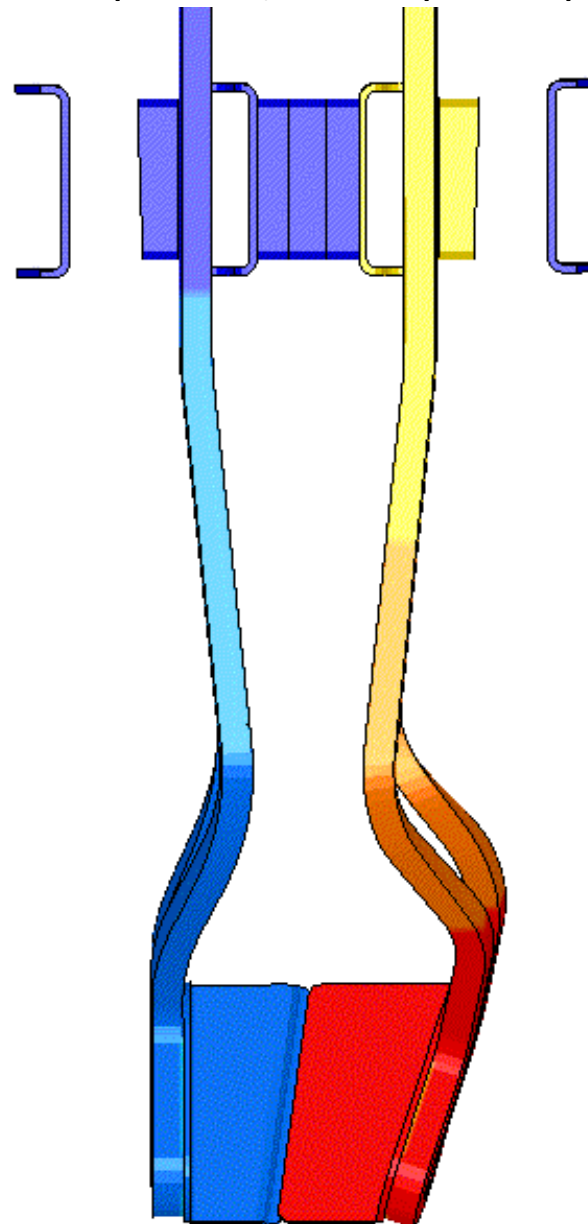


$$P_- = const = 100 \text{ кПа}$$

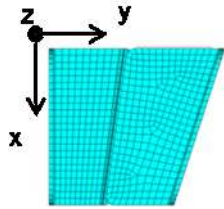


## Распределение перемещений при открытии створок

Time = 0.3  
Contours of Resultant Displacement  
min=0, at node# 860573  
max=0.00185186, at node# 1101807



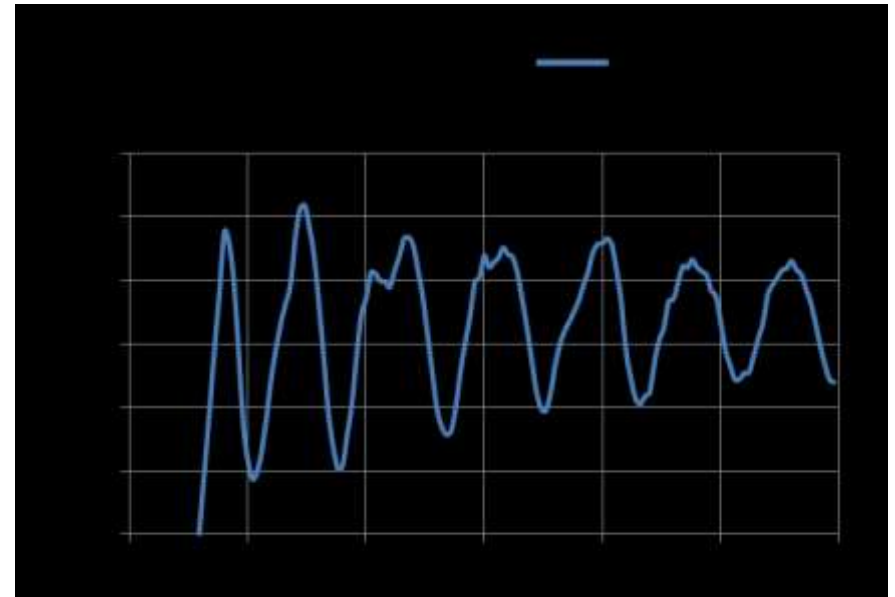
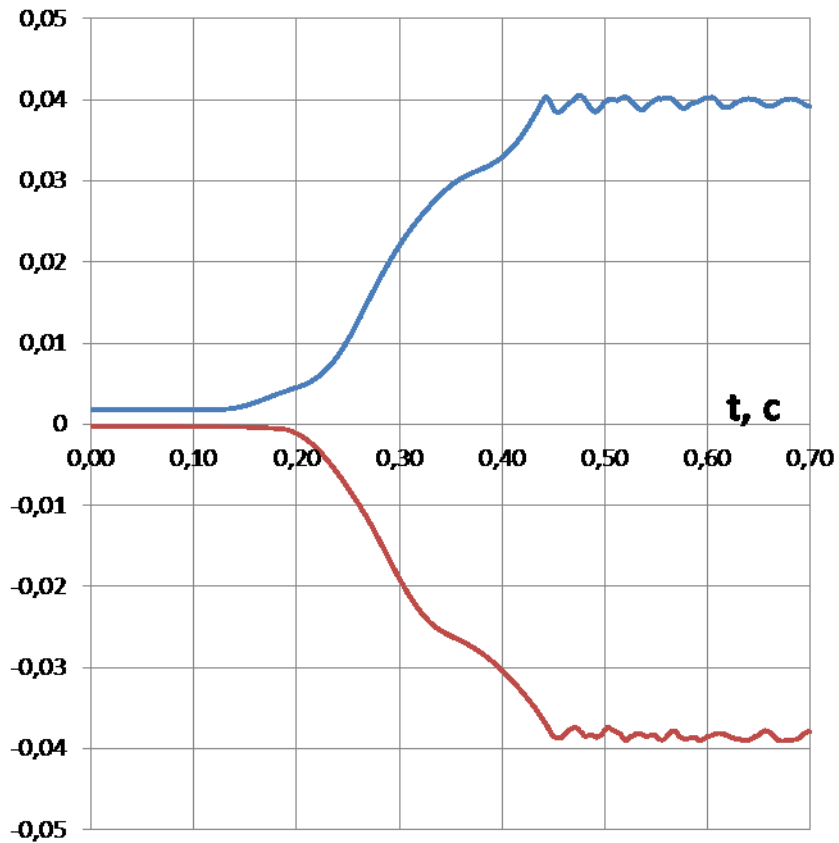




## Колебания створок

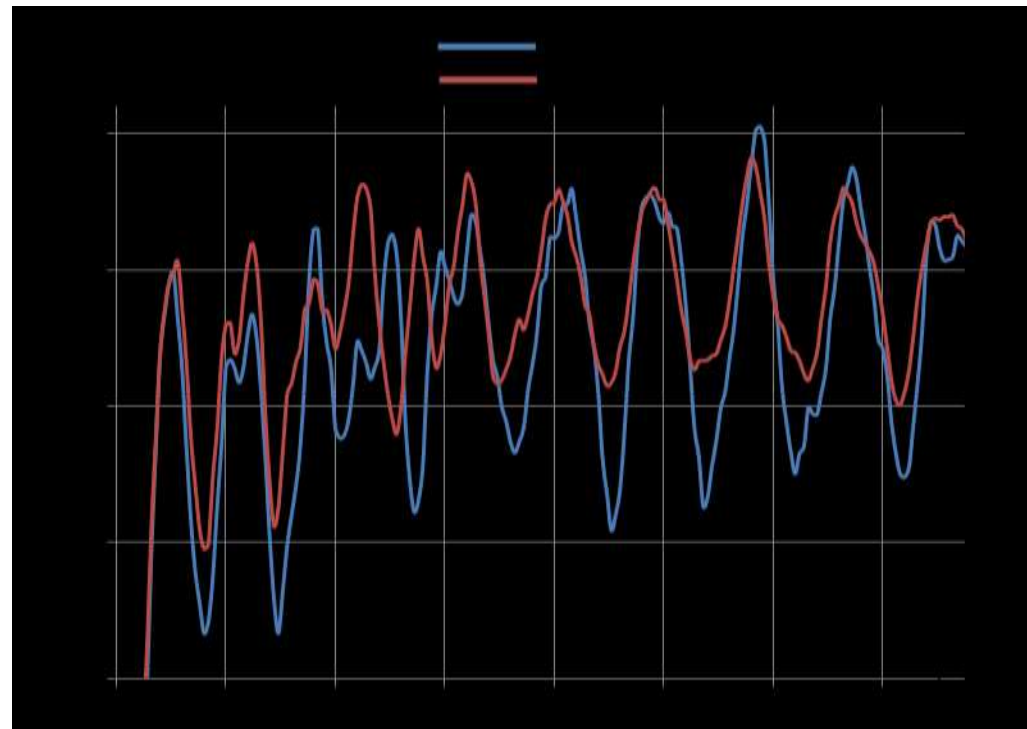
Перемещения  
вдоль оси  $y$ , м

— Левая створка  
— Правая створка



# Колебания створок

- Удар правого рычага об упор произошёл через 0.44 с после начала увеличения давления  $P_{+-}$ .
- Удар левого рычага об упор произошёл через 0.454 с после начала цикла открытия.
- Максимальная амплитуда колебаний правой створки – 0.8 мм (без демпфирования)
- Максимальная амплитуда колебаний правой створки – 1.1 мм (без демпфирования)
- После введения демпфирования амплитуда колебаний створок не превышает 1 мм.





## Основные выводы

- Определены рабочие параметры и проверена работоспособность конструкции. (подобраны значения давлений в актуаторе при раскрытии, створок, рассмотрена зависимость давления от времени, обоснована её корректность в нашей задаче)
- Рассмотрены контактные давления и поверхности соприкосновения при контактном взаимодействии в упорах. Отмечается необходимость выбора материала с иными свойствами.
- Определена необходимость перепроектирования ряда конструктивных элементов  
(выявлены высокие напряжения в упругих дисках)