



Выпускная работа бакалавра на тему

Конечно-элементное моделирование контактного взаимодействия компонентов защитного устройства системы диагностики токамака ITER

Направление:

15.03.03 – Прикладная механика

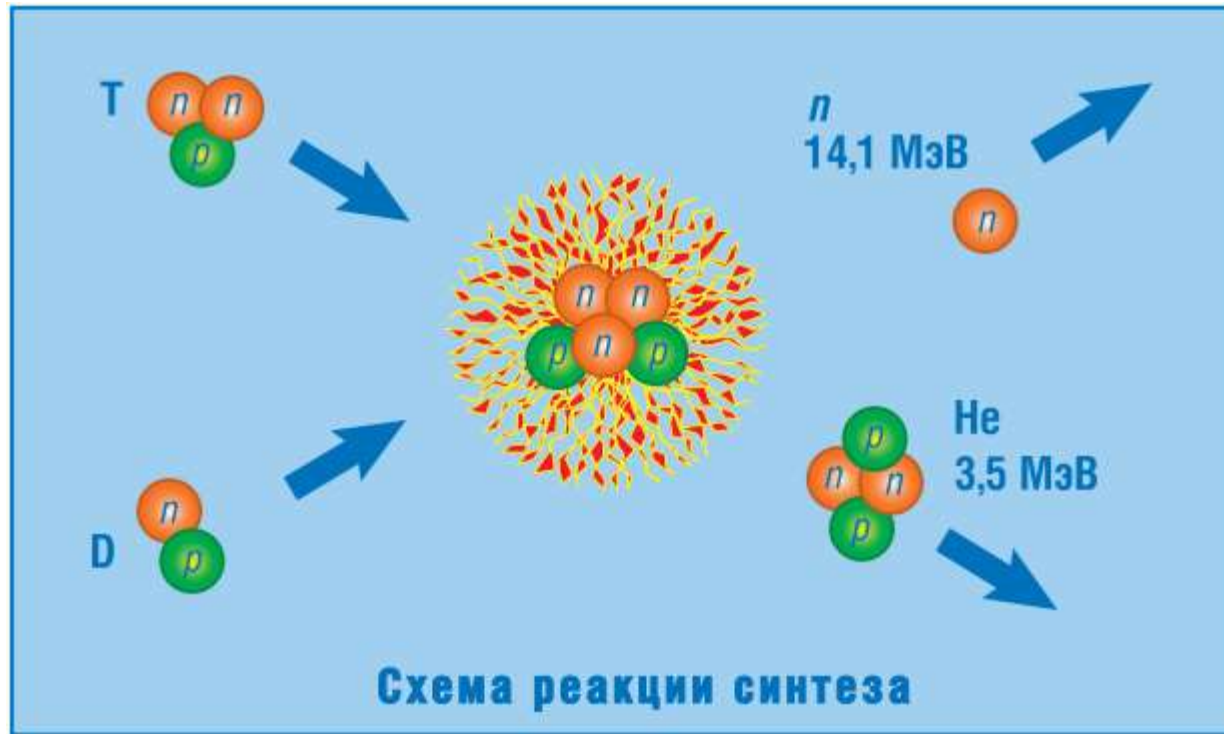
Выполнил студент группы 43602/2

Ермакова Л. Д.

Руководитель, асс.

Ховайко М. В.

Управляемый термоядерный синтез



Слияние ядер
дейтерия и трития –
наиболее
осуществимая
термоядерная
реакция.

Условия осуществления ядерного синтеза:

1) Температура выше 10^8 К (100 М°С)

2) $n\tau > 10^{14} \frac{\text{с}}{\text{см}^3}$ - критерий Лоусона, где n — плотность

высокотемпературной плазмы, τ — среднее время удержания плазмы.

Международный термоядерный реактор ITER

Схема реактора:

1. Центральный соленоид
2. Катушки полоидального поля
3. Катушки тороидального поля
4. Вакуумная камера
5. Криостат
6. Дивертор

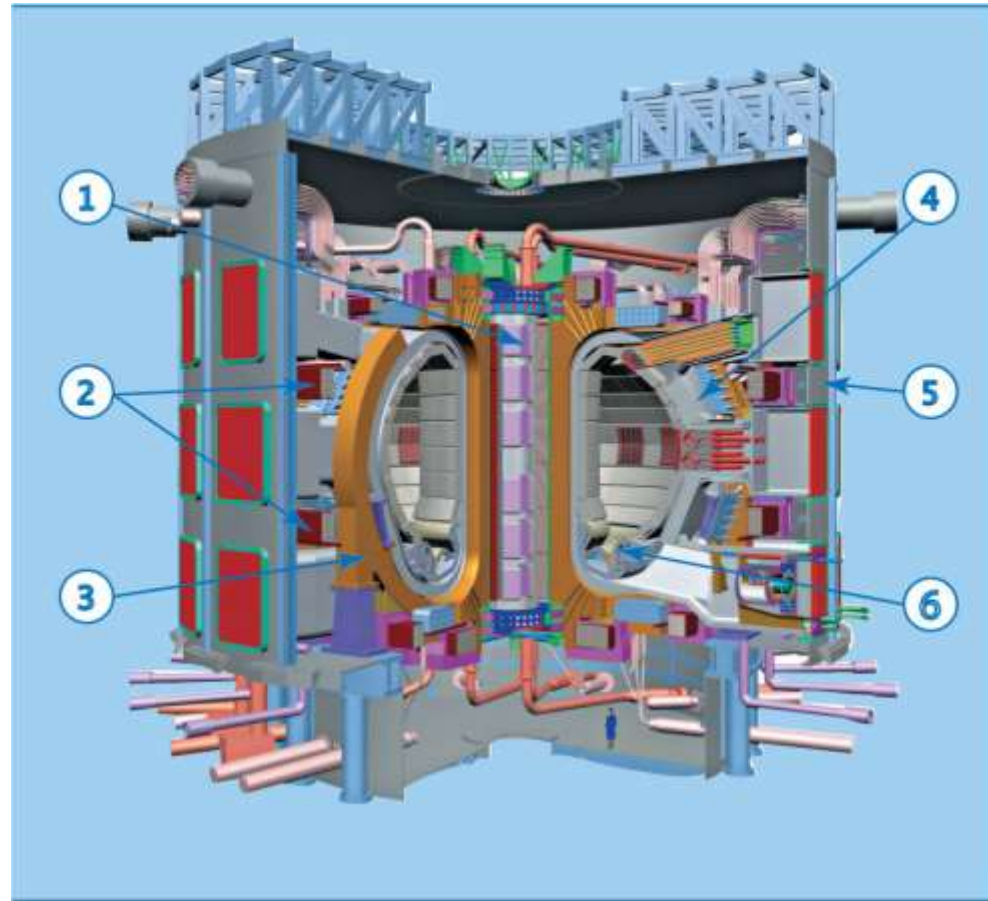
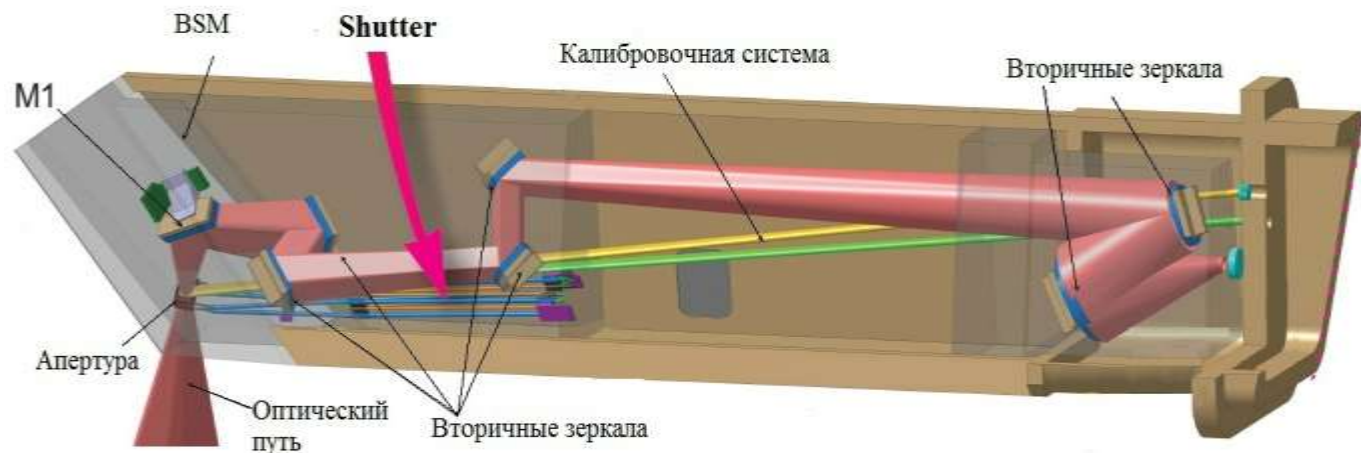
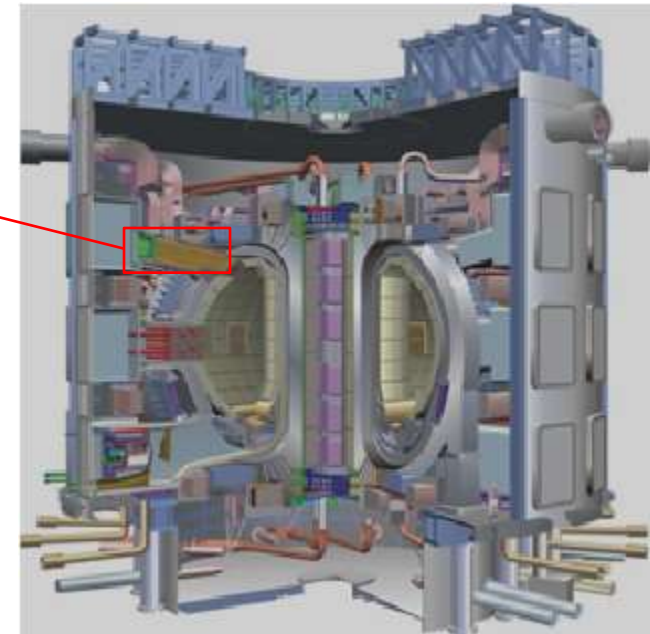
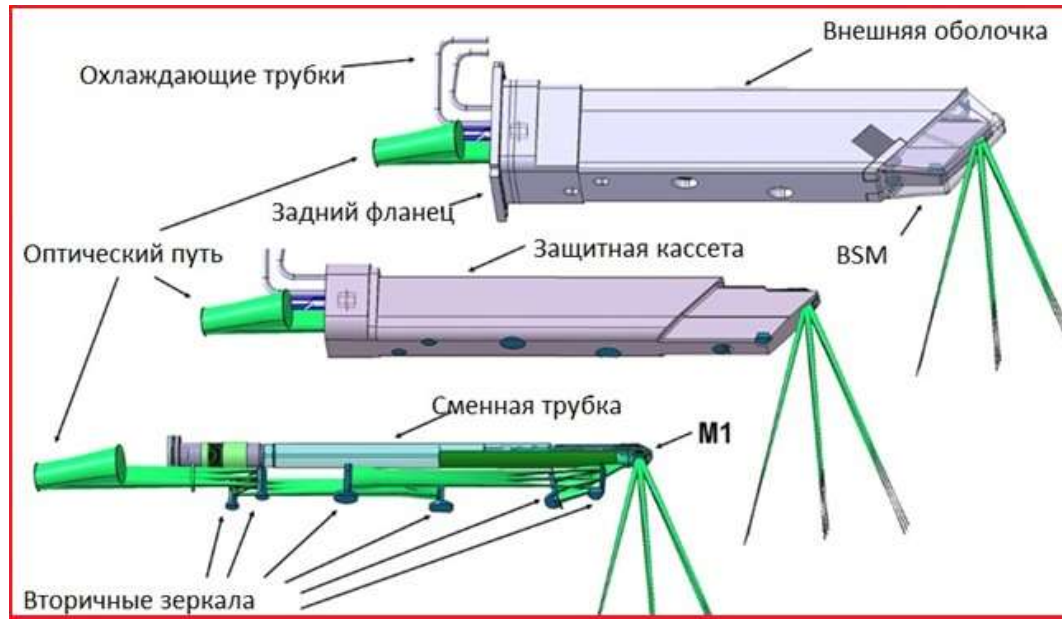


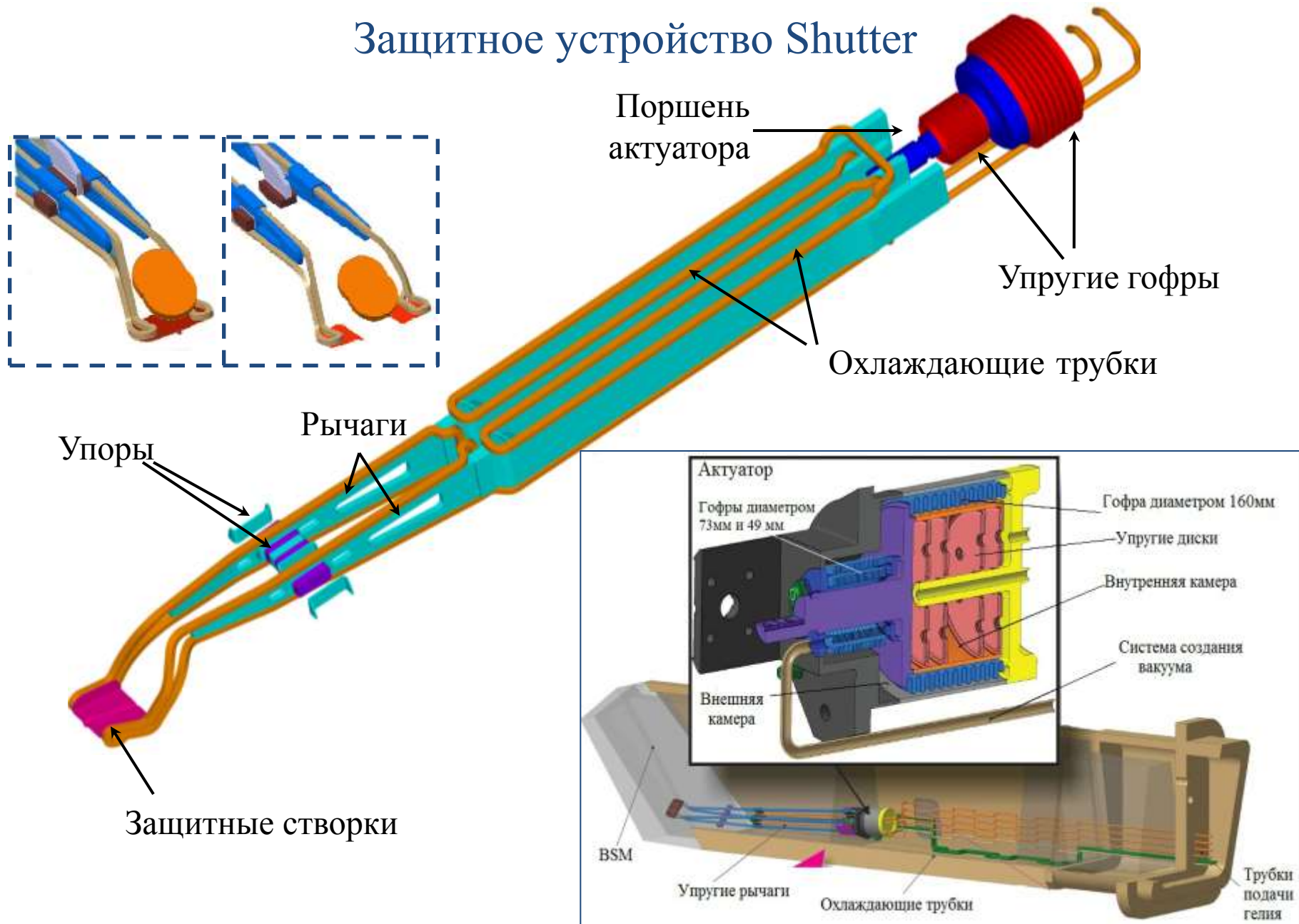
Табл.1 Проектные параметры реактора:

Термоядерная мощность, МВт	500	Малый радиус плазмы, м	2,0
Мощность доп. нагрева, МВт	73	Ток плазмы, МА	15
Средняя нейтронная нагрузка на стенку, MBm / m^2	0,57	Тороидальное магнитное поле на оси, Тл	5,3
Время горения плазмы в индуктивном режиме, с	≥ 400	Объем плазмы, m^3	837
Большой радиус плазмы, м	6,2	Площадь поверхности плазмы, m^2	678

Система диагностики CXRS

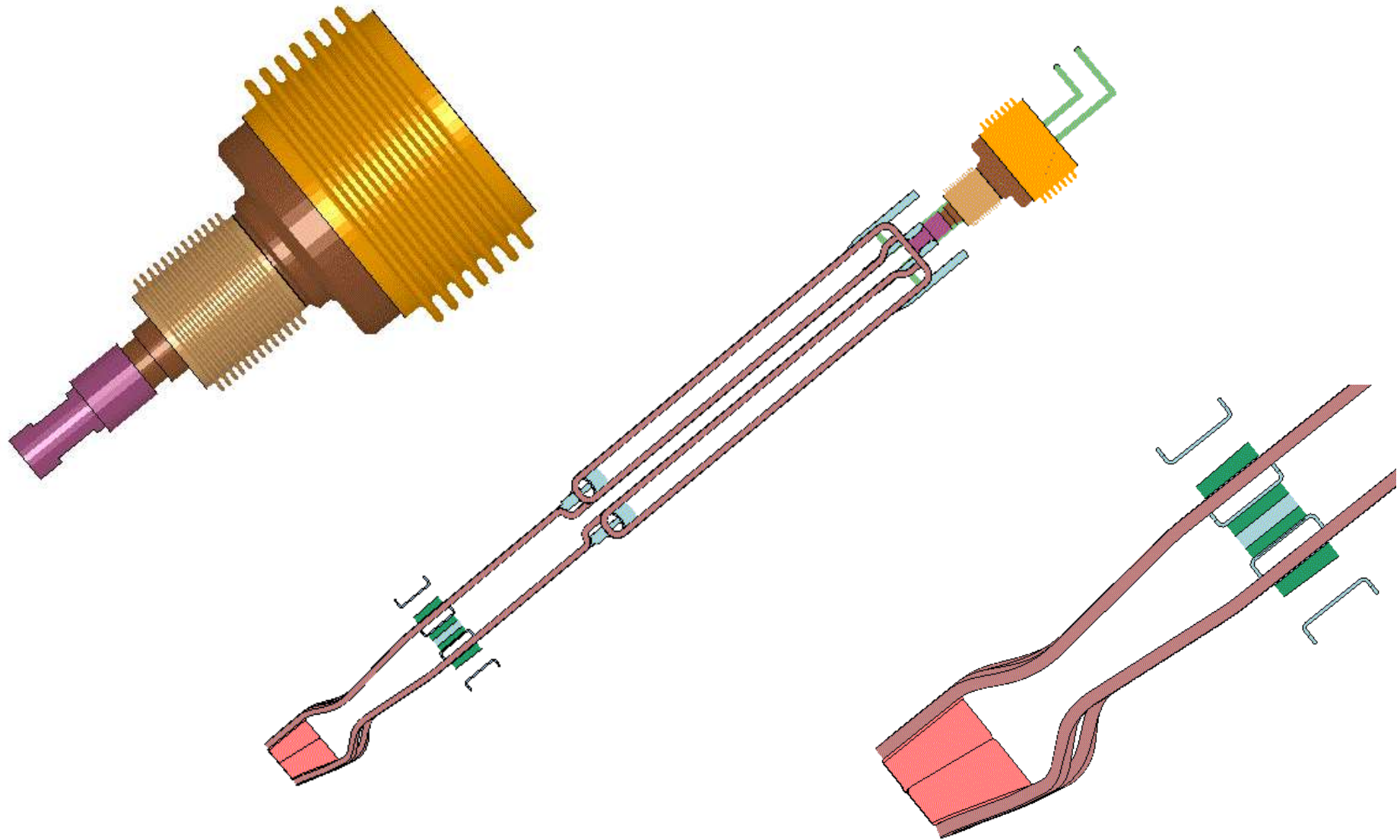


Защитное устройство Shutter





Принцип работы Shutter





Статические расчёты

Основные цели

При выполнении статических расчётов необходимо:

- Определить силы, при которых происходит полное раскрытие/закрытие створок (соприкосновение с неподвижными упорами).
- Определить области контакта в подвижных упорах, максимальные контактные давления, проникновения для двух случаев:
 - а) материал бамперов совпадает с основным материалом конструкции.
 - б) материал бамперов имеет меньшую жесткость, чем основной материал.
- Произвести перемещение внешних/внутренних неподвижных упоров для увеличения области контактного взаимодействия и её расположения ближе к центру подвижных частей конструкции также для двух случаев.
- Выявить области возникновения максимальных эквивалентных напряжений.



Упрощенная модель

- Аналитическое решение

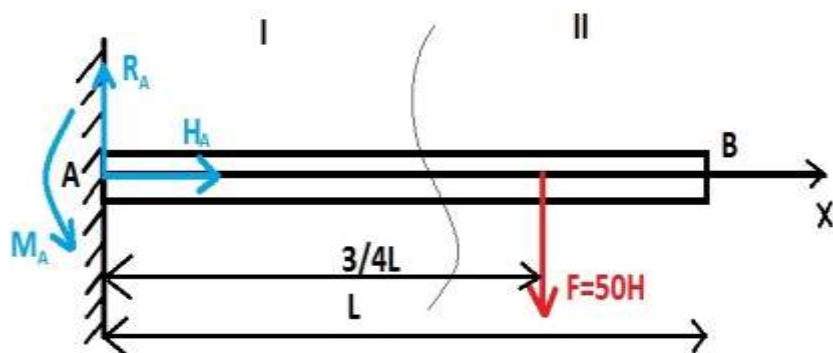


Табл.2 Характеристики модели:

Длина, м	1.8
Площадь сечения, м^2	0.0008
Модуль Юнга, ГПа	200
Коэффициент Пуассона	0.3
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	7932

Граничные условия: $x = 0: y = 0, \frac{\partial y}{\partial x} = 0$

$$x = l: \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$$

Решение:

$$EI_z y'' = (-M_A + R_A \cdot x)|_I - F \cdot (x - \frac{3}{4}l)|_{II}$$

$$EI_z y' = (-M_A x + R_A \cdot \frac{x^2}{2})|_I - F \cdot \frac{(x - \frac{3}{4}l)^2}{2}|_{II} + C_1$$

$$EI_z y = (-M_A \frac{x^2}{2} + R_A \cdot \frac{x^3}{6})|_I - F \cdot \frac{(x - \frac{3}{4}l)^3}{6}|_{II} + C_1 x + C_2$$

Применяя граничные условия:

$$y(l) = \frac{-\frac{3}{4}F \frac{l^3}{2} + F \cdot \frac{l^3}{6} - F \cdot \frac{(\frac{1}{4}l)^3}{6}}{EI_z} = -0.0459 \text{ м}$$



- Численное решение

Конечно-элементная модель:

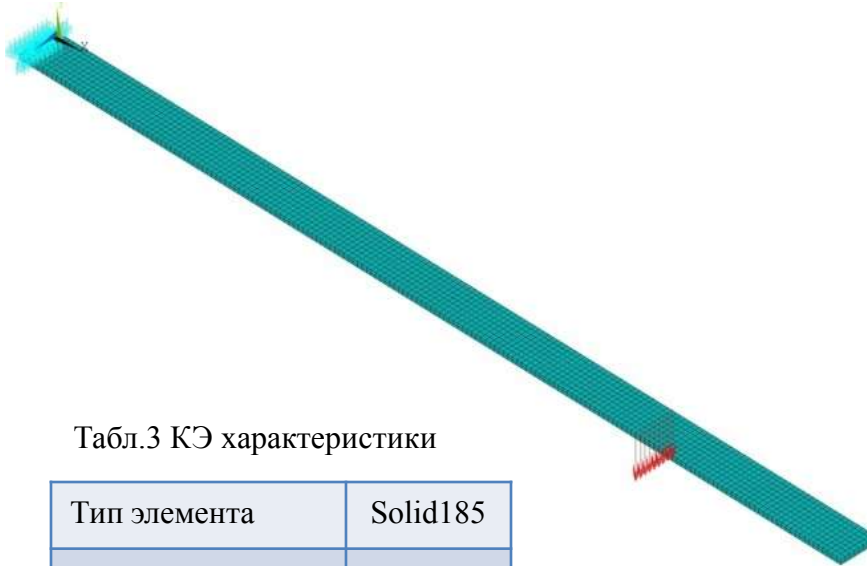


Табл.3 КЭ характеристики

Тип элемента	Solid185
Размер элемента	0.003

Конечно-элементное решение:



Табл.4 Сравнение результатов

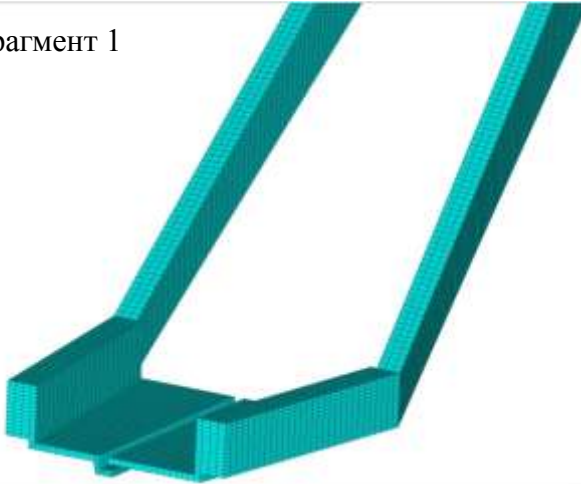
	Аналитическое решение	Численное решение	Относительная погрешность
Перемещение, м	-0.0459	-0.0451	0. 017%



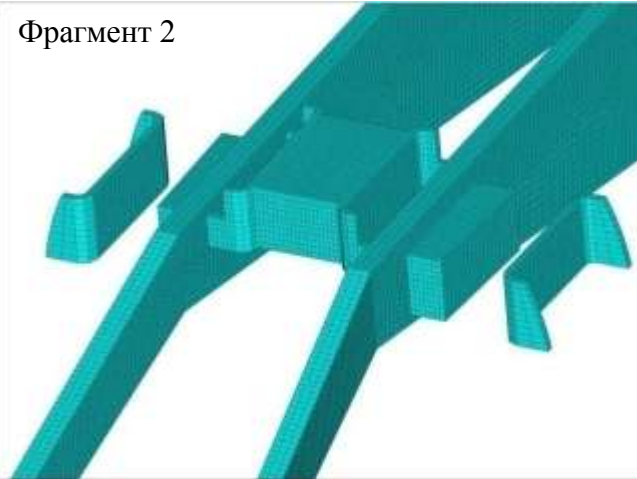
Конечно-элементная модель

Тип элемента	Число элементов	Число узлов	Число степеней свободы
SOLID 185	98293	141047	423141

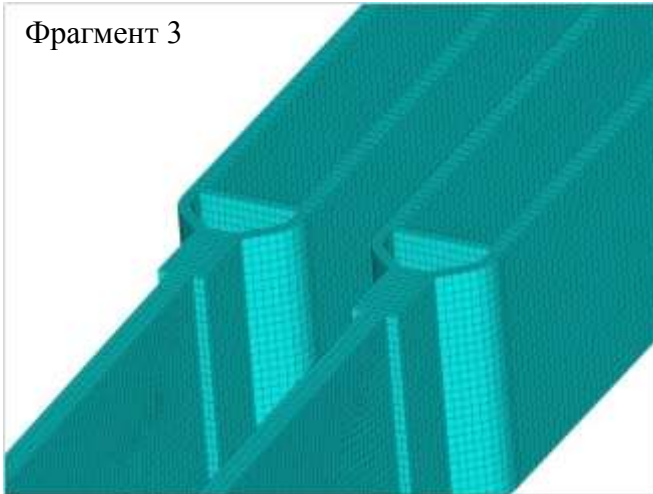
Фрагмент 1



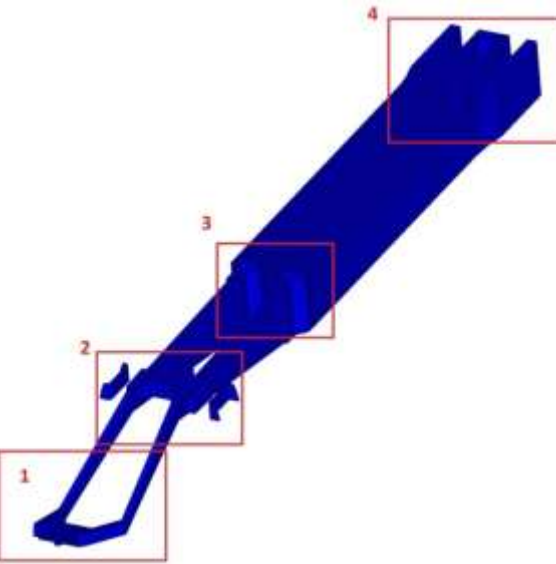
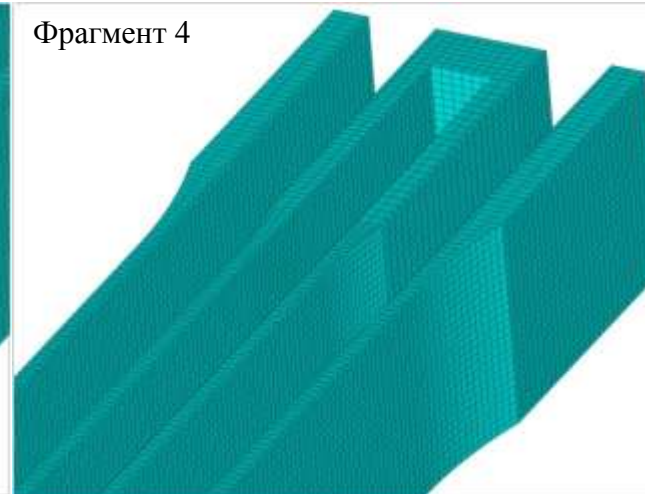
Фрагмент 2



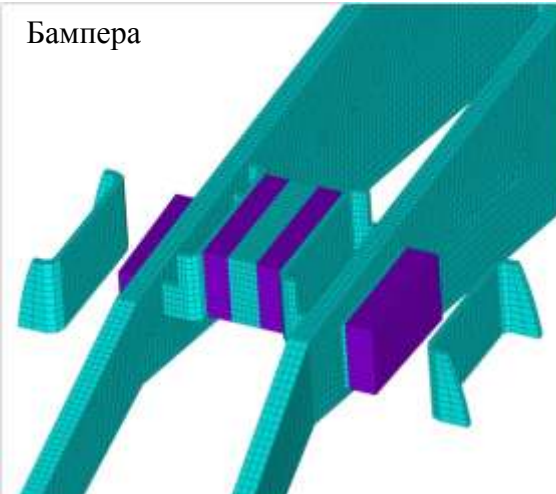
Фрагмент 3



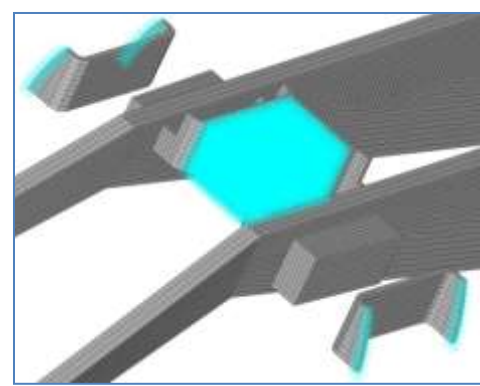
Фрагмент 4



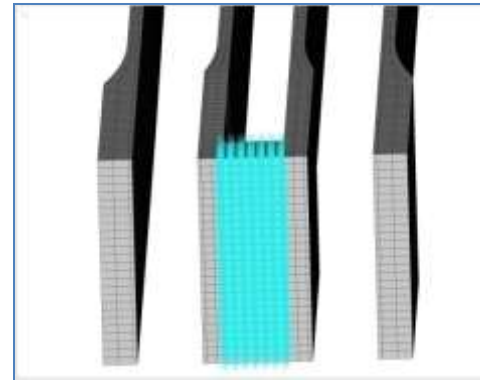
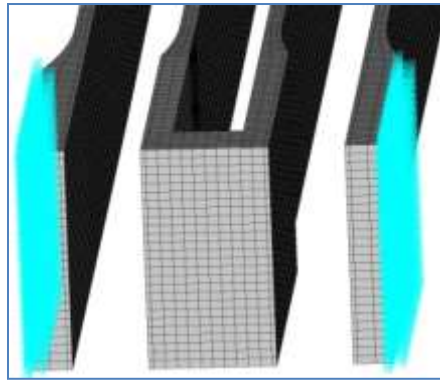
Геометрическая модель



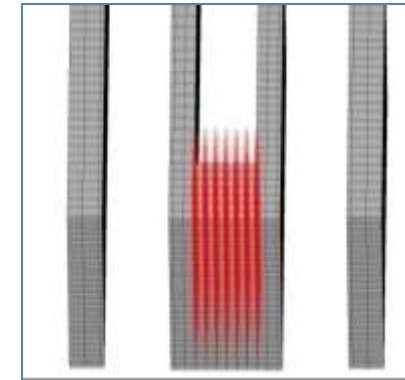
Граничные условия и нагрузки



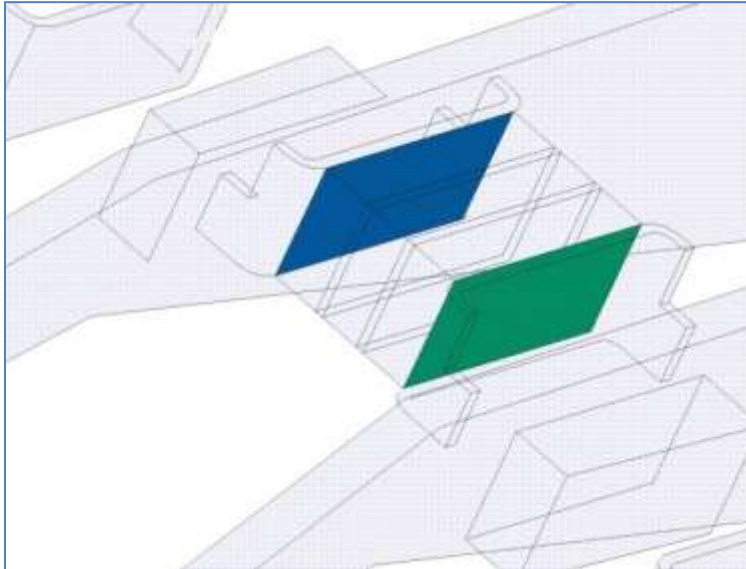
$$U_x = U_y = U_z = 0$$



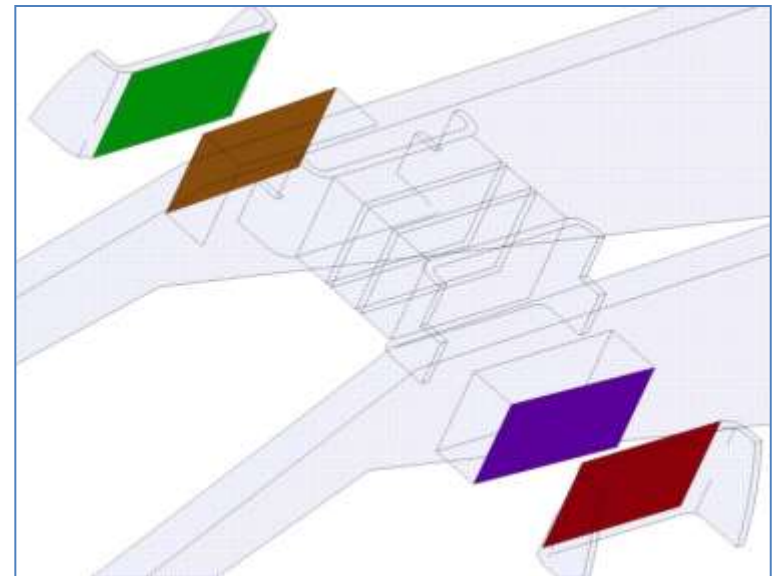
$$U_y = U_z = 0$$



Приложение силы



Внутренние контакты пары



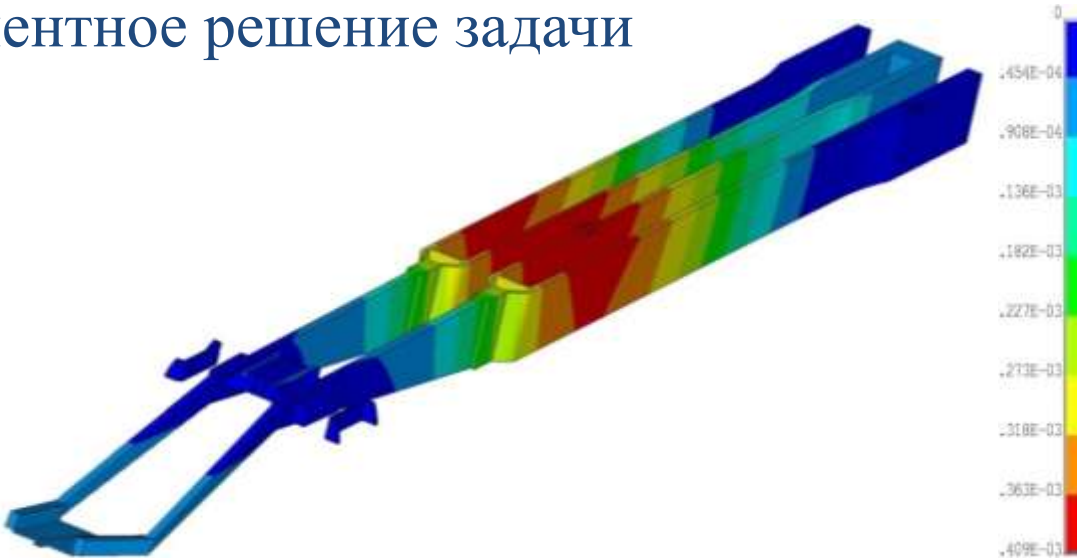
Внешние контакты пары



Конечно-элементное решение задачи

•Задача 1 $F = -1500\text{Н}$

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Коэфф. Пуассона	Плотность
Основной материал	200	0.3	7932
Материал пониженной жесткости	1.86	0.03	2000



Распределение перемещений, м

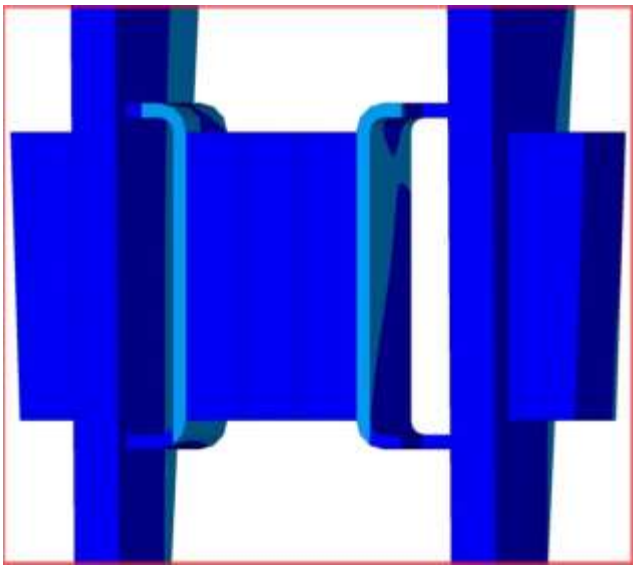
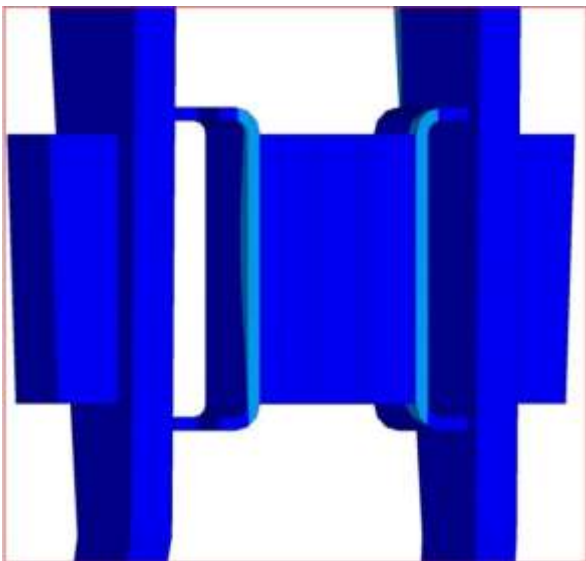
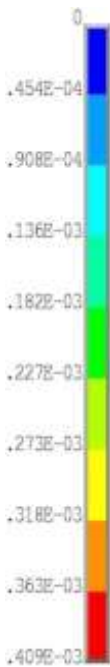
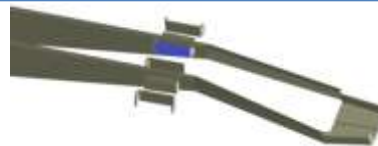
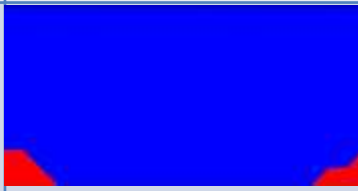
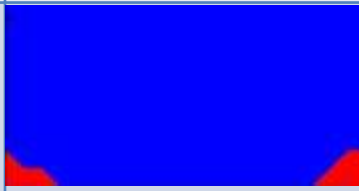
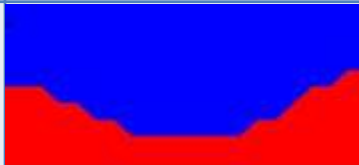




Табл.7 Область взаимодействия и контактные параметры

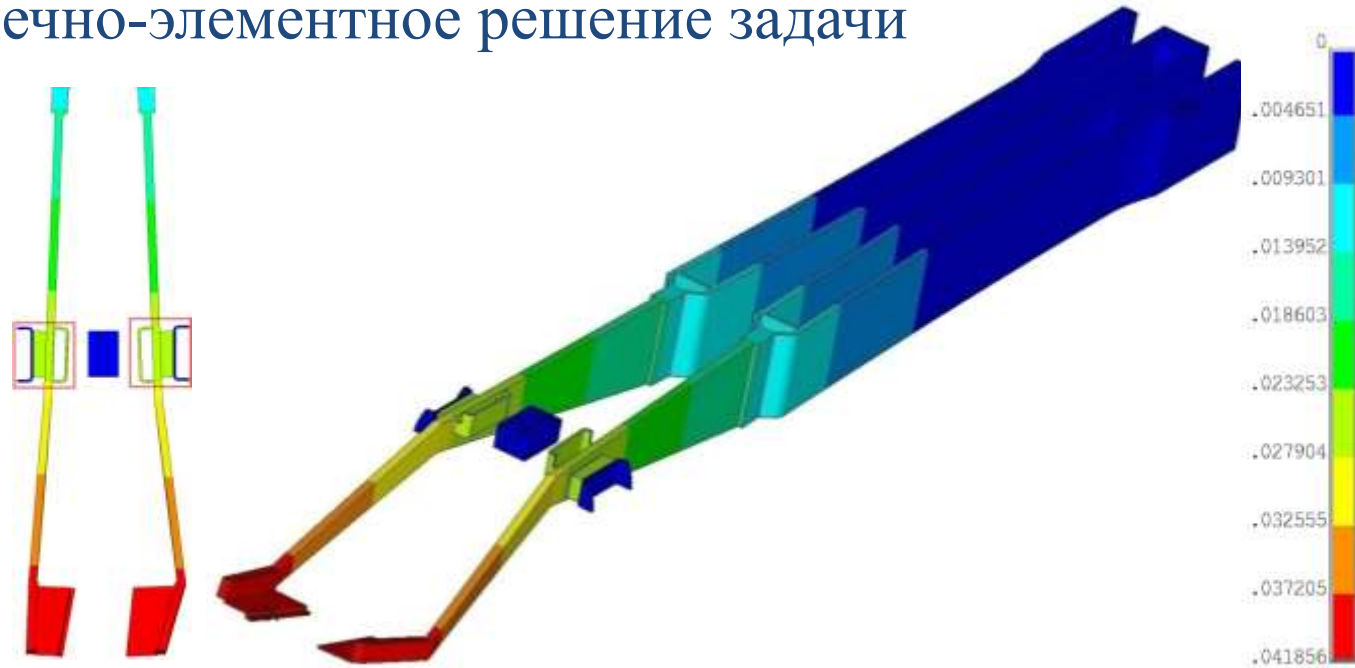
Материал для бамперов	Левый упор			Правый упор		
						
	Область контакта	Макс.конт. давление, МПа		Область контакта	Макс.конт. давление, МПа	
Совпадает с основным материалом конструкции		4.31			5.33	
Пониженной жесткости		0.288			0.364	
Материал для бамперов	Левый упор			Правый упор		
	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н
Совпадает с основным материалом конструкции	0.00084	4.31	44.684	0.00069	5.33	44.589
Пониженной жесткости	0.00605	0.288	44.827	0.00511	0.364	44.749



Конечно-элементное решение задачи

•Задача 2

$$F = 3500 \text{ Н}$$



Распределение перемещений, м

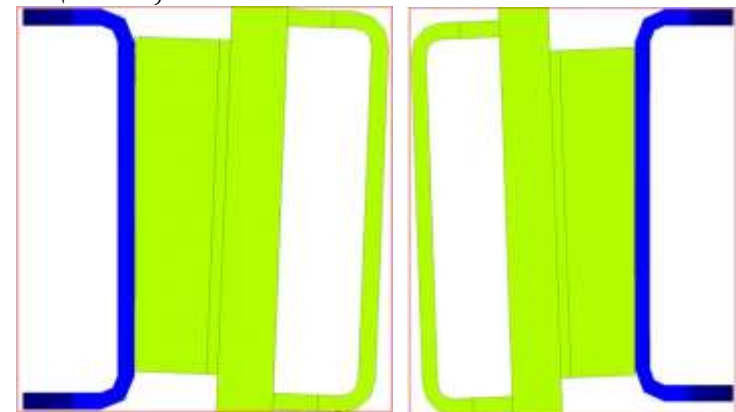
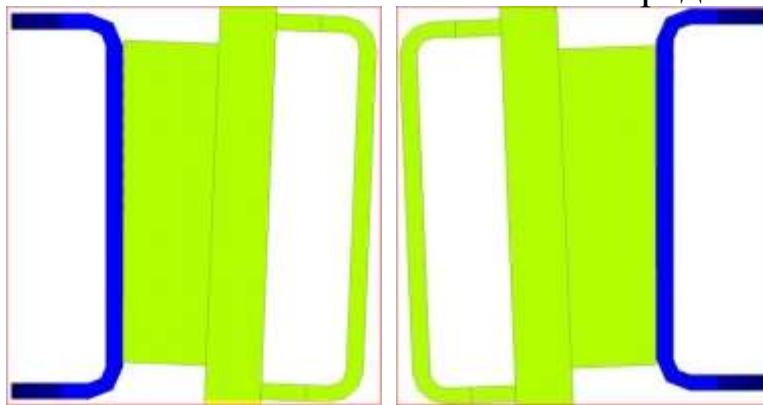




Табл.8 Область взаимодействия и контактные параметры

Материал для бамперов	Левый упор			Правый упор		
						
	Область контакта		Макс.конт. давление, МПа	Область контакта		Макс.конт. давление, МПа
Совпадает с основным материалом конструкции			0.169			4.97
Пониженной жесткости			0.561			0.704
Материал для бамперов	Левый упор			Правый упор		
	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н
	0.000026	0.169	0.356	0.00097	4.97	11.183
Пониженной жесткости	0.00916	0.561	6.427	0.01210	0.704	8.698



•Задача 3

$$F = 5000 \text{ Н}$$

Табл.9 Область взаимодействия и контактные параметры

Материал для бамперов	Левый упор			Правый упор		
						
	Область контакта	Макс.конт. давление, МПа		Область контакта	Макс.конт. давление, МПа	
Совпадает с основным материалом конструкции		11.1			10.1	
Пониженной жесткости		0.976			1.26	
Материал для бамперов	Левый упор			Правый упор		
	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н
	Совпадает с основным материалом конструкции	0.00167	11.1	43.579	0.00198	10.1
Пониженной жесткости	0.0159	0.976	43.581	0.01980	1.26	47.715

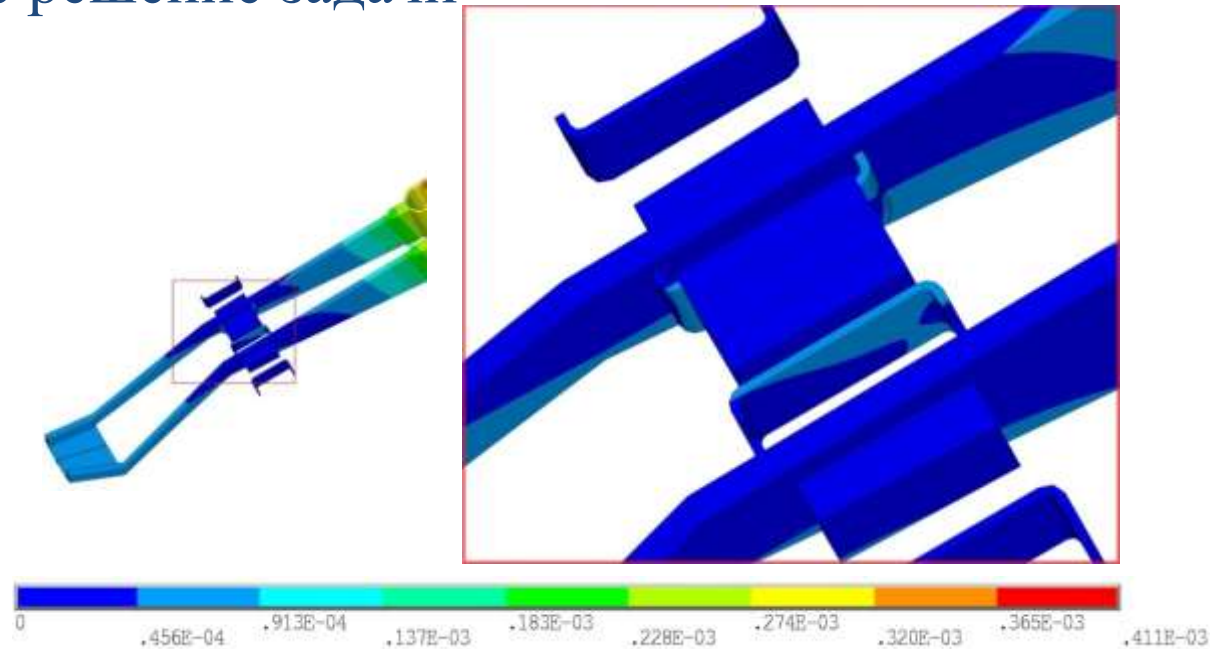
Конечно-элементное решение задачи

•Задача 4

$$F = -1500 \text{ Н}$$

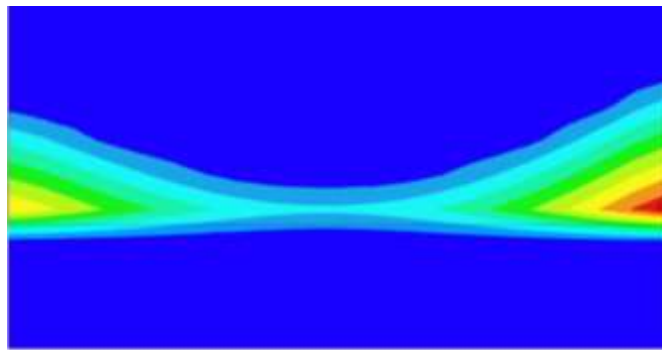
Дадим перемещение
внутренним упорам:

$$x = -0.01 \text{ м}$$

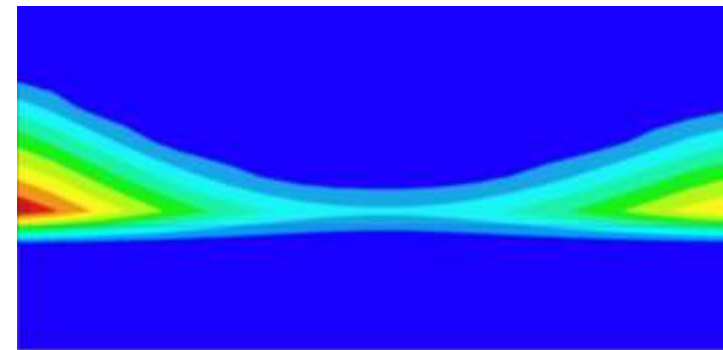


Распределение перемещений , м

Левый бампер



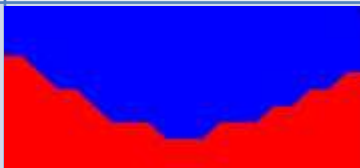
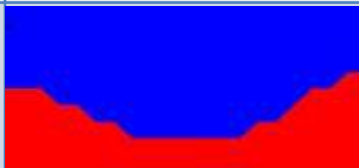
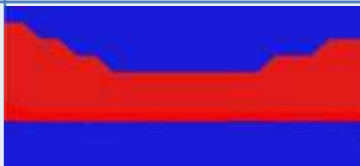
Правый бампер



Распределение контактного давления, Па



Табл.10 Область взаимодействия и контактные параметры

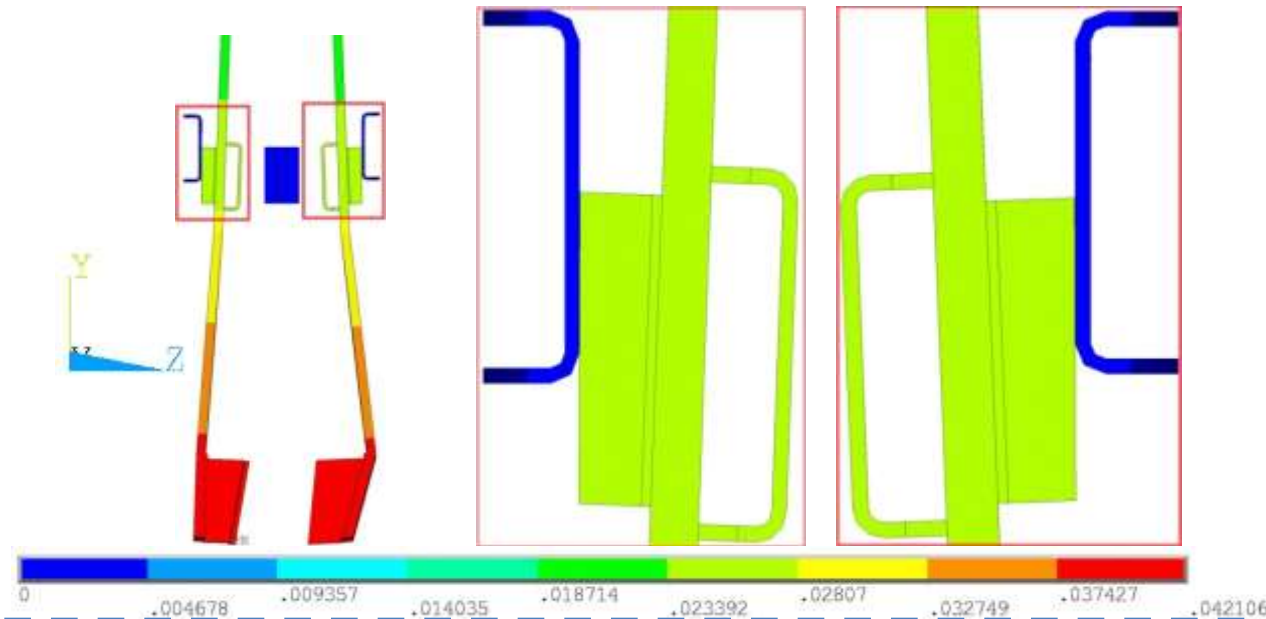
Положение неподвижных упоров	Левый упор			Правый упор		
						
	Область контакта	Макс.конт. давление, МПа		Область контакта	Макс.конт. давление, МПа	
До смещения		0.288			0.364	
После смещения		0.308			0.307	
Положение неподвижных упоров	Левый упор			Правый упор		
	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н	Макс. контактное проникновение, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н
До смещения	0.00605	0.288	44.827	0.00511	0.364	44.749
После смещения	0.00646	0.308	44.803	0.00643	0.307	44.707

Конечно-элементное решение задачи

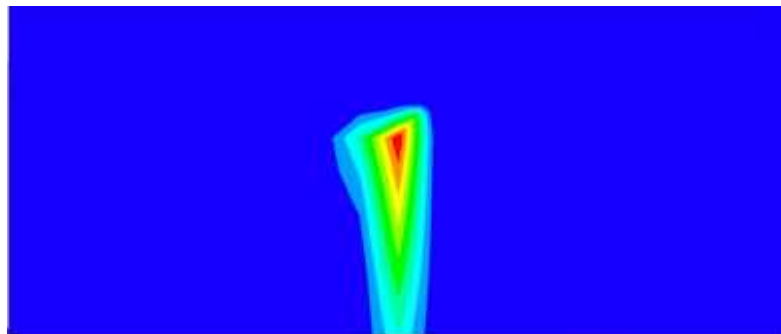
•Задача 5

$$F = 5000 \text{ Н}$$

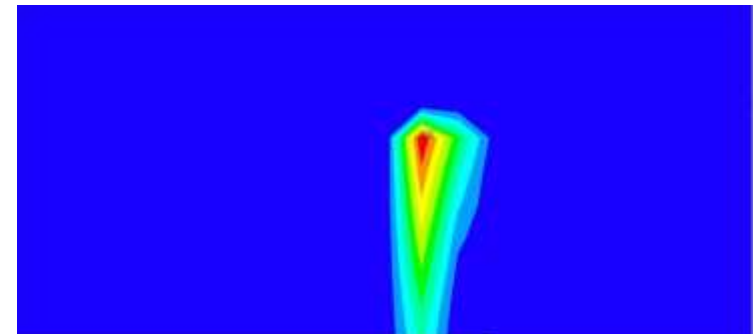
Дадим перемещение
внешним упорам:
 $x = 0.01\text{м}$, $y = 0.03\text{м}$



Левый бампер



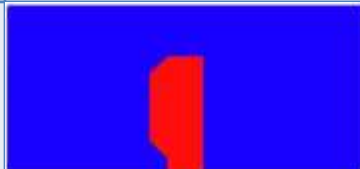
Правый бампер



Распределение контактного давления, Па



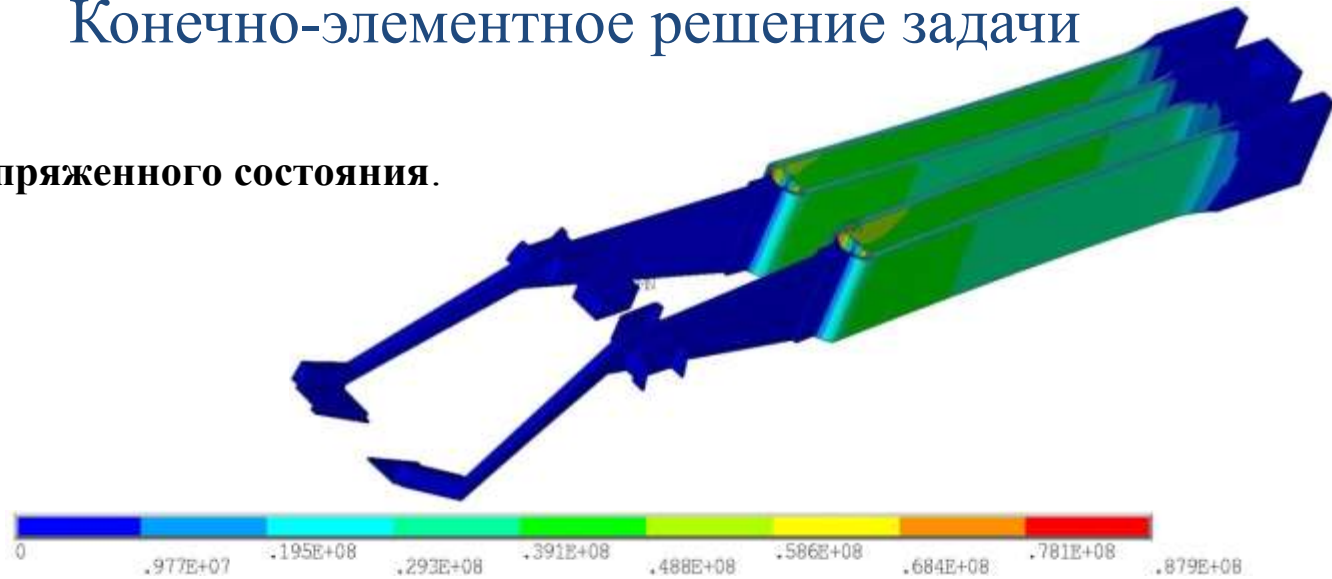
Табл.11 Область
взаимодействия и
контактные
параметры

Положение неподвижных упоров	Левый упор			Правый упор		
						
	Область контакта	Макс.конт. давление, МПа		Область контакта	Макс.конт. давление, МПа	
До смещения		0.976			1.26	
После смещения		1.02			1.02	
Положение неподвижных упоров	Левый упор			Правый упор		
	Макс. контактное проникнове ние, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н	Макс. контактное проникнове ние, мм	Макс. контактное давление, МПа	Контактная сила в упорах, Н
	До смещения	0.0159	0.976	43.58	0.0198	1.26
После смещения	0.0166	1.02	44.78	0.0167	1.02	49.809

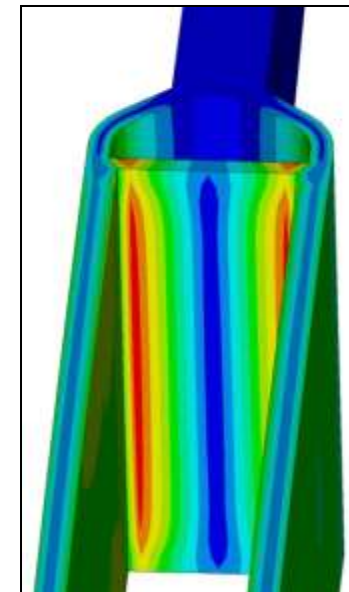
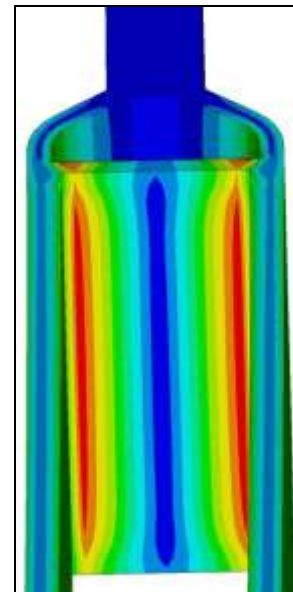
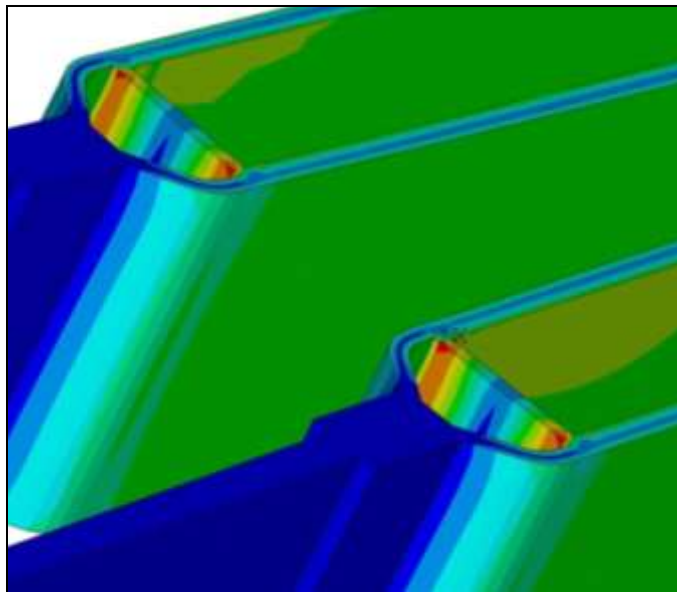
Конечно-элементное решение задачи

•Задача 6

Исследование напряженного состояния.



Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений, Па





ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Определены рабочие параметры и проверена работоспособность конструкции. (подобраны значения силы со стороны актуатора для полного раскрытия/затворок створок).
- Было смоделировано несколько вариантов контактного взаимодействия компонентов защитного устройства с этими силами. Подобран материал для бамперов, дающий большую область контакта.
- Было предпринято перемещение внешних и внутренних неподвижных упоров для увеличения области контакта и смещения её к центру подвижных частей конструкции, что привело к их равномерной нагруженности .
- Проверено напряженное состояние конструкции. Напряжения не превышают предела текучести для материала.



Дальнейшие направления исследования

- Повороты упоров для увеличения области контакта
- Расчеты на более детализированной модели (с учетом трубок охлаждения и т.д.)
- Динамические расчеты модели с новым положением упоров и новым материалом бамперов (время раскрытия/закрытия створок при заданной нагрузке, определить амплитуды и частоты колебаний створок после удара)
- Тепловые задачи (максимальные напряжения, обусловленные нагревом; температурные деформации)



Спасибо за внимание!