

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Техническая механика»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.
Сапожников С.Б.

“ ____ “ _____ 201_ г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАССО-ГАБАРИТНОГО МАКЕТА СПУТНИКА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 15.03.03.2018.399 ПЗ ВКР

Руководитель проекта, д.т.н.

Сапожников С.Б.

“ ____ “ _____ 20_ г.

Автор проекта

студент группы П – 429

Бердюгин А.А.

“ ____ “ _____ 20_ г.

Нормоконтролер, к.т.н.

“ ____ “ _____ 20_ г

Челябинск 2018

АННОТАЦИЯ

Бердюгин А.А. Проектирование массо-габаритного макета спутника – Челябинск: ЮУрГУ, П; 2018, с. ил., табл., библиогр. список – наим.

В выпускной квалификационной работе на тему «Проектирование массо-габаритного макета спутника» изложены результаты проектирования двух макетов спутника, удовлетворяющих требованиям технического задания.

Разработаны конечно-элементные модели макетов и с помощью программы ANSYS Workbench смоделирован критичный случай нагружения.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты:

1. Исследовано влияние на динамические характеристики механической системы входящих в неё параметров с помощью упрощенной модели.
2. Проведена работа по проектированию массо-габаритного макета в целом и подетально, учитывая возможности использования стандартных деталей (труб, листов).
3. Построена рациональная сетка конечных элементов и исследована сходимость результатов при уменьшении размеров конечных элементов.
4. Проведено исследование прочности массогабаритного макета спутника на основе эквивалентных по Мизесу напряжений.
5. Проведена оценка двух макетов на выявление лучшего результата.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ		
1.	ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	6
2.	ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	8
2.1	Цели и задачи	8
2.2	Требования к массо-габаритному макету спутника	8
3.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАССО-ГАБАРИТНЫХ МАКЕТОВ.....	9
3.1	Эскизный проект.....	9
3.2	Проектирование моделей.....	12
3.3	Собственные изгибные и продольные частоты массо-габаритных макетов.....	15
3.4	Исследование моделей на пластическую деформацию.....	19
4.	СРАВНЕНИЕ МАССО-ГАБАРИТНЫХ МАКЕТОВ.....	22
5.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	23
6.	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	24
7.	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	25

						<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>2</i>

Число космических запусков в СССР/РФ и процент неудачных



Рисунок 2 – процентное соотношение неудачных запусков космических запусков

Но даже при успешном запуске ракеты что-то может пойти не так. Выход из строя спутника может произойти уже после вывода на орбиту. И чтобы этого не произошло, нужно проводить множество испытаний на дорогостоящем оборудовании. Одним из таких испытательных оборудований является вибростенд.



Рисунок 3 – Вибростенд электромеханический

Он имитирует колебания при транспортировке спутника и старте РН. Тем самым указывает на слабые места в конструкции.

						Лист
						4
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата		

150303.18.399.00.ПЗ ВКР

Однако при проектировании новых вибростендов ставится задача испытания его конструкции с установленным макетом спутника. Такой макет должен быть динамически «похож» на спутник, т.е. иметь близкую массу и близкие собственные частоты колебаний.

При испытаниях вибростендов проверяется на прочность и конструкция самого вибростенда и макета спутника. Разумеется, ни то ни другое не должно разрушаться при испытаниях.

Испытания спутника на вибростенде имеет также целью удовлетворение требований страховых компаний по надежности этого дорогостоящего объекта. Поэтому комплекс: вибростенд, массогабаритный макет и сам спутник – предмет особого внимания при проектировании, отладке и эксплуатации.

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						5
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Назначение виброиспытаний

1.1.1 Летательные аппараты, транспортные средства, энергетическое оборудование в эксплуатационных условиях испытывают различные виды воздействия, климатических факторов, акустического поля, линейный ускорений, вибраций и ударов. Повышение надёжности, долговечности и качества функционирования упомянутых объектов и их элементов достигается путём моделирования внешних воздействий в лабораторных условиях.

Создание средств моделирования комплексных воздействий на объект является сложной задачей и поэтому проводятся испытания при моделировании одного воздействия.

Большое количество отказов аппаратуры происходит из-за интенсивных механических вибраций. Кроме того, вопросы прочности и надёжности при воздействии вибраций давно приобрели решающее значение при конструировании и разработке машин. Во время эксплуатации аппарат может подвергаться различному режиму нагружения – периодического, близкого к гармоническому, ударного и случайного. Режимы нагружения, в свою очередь, группируются в совокупности, представляющие собой непересекающиеся собственные подмножества указанного множества и называемыми случаями нагружения. Случаи нагружения соответствуют определённым случаям эксплуатации изделия (его агрегатов), режимы нагружения - участкам стационарности нагрузок внутри случаев нагружения. Разбиение случаев нагружения на режимы осуществляется путём дискретизации функций нагруженности, представляющих детерминированные зависимости (или амплитуды) нагрузок от параметров условий эксплуатации, определяющих нагруженность, например, от скорости наземной транспортировки, и соответствующей дискретизации функций плотности вероятностей названных параметров.

1.1.2 Существуют две категории причин выхода из строя испытываемых объектов, определяющих их надёжность:

- 1) усталостное разрушение конструктивных элементов;
- 2) отклонение основных параметров за пределы норм, характеризующих исправное функционирование.

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						6
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

При виброиспытаниях решают две задачи, вытекающие из требований, формируемых в процессе разработки, создания и требований эксплуатации:

- 1) оценивают срок службы испытываемого объекта;
- 2) разрабатывают методы испытаний, которые соответствуют типичным случаям вибрационного воздействия во время эксплуатации объекта и могут быть пригодны для обязательных приемо-сдаточных испытаний.

1.1.3 Испытательным оборудованием для спутников и схожими с ним космическими аппаратами является вибростенд. Он позволяет смоделировать вибрации схожие с теми, что происходят при транспортировке, старте РН, полёте спутника.



Рисунок 4- Проведение виброиспытаний спутника

Вибростенд кроме создания колебательных воздействий, также испытывает их на себе. При достаточном накоплении усталостных повреждений или при первом проверочном запуске при максимальных нагрузках испытательный аппарат может выйти из строя и привести к тяжелым последствиям.

										Лист
										7
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата						

150303.18.399.00.ПЗ ВКР

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАССО-ГАБАРИТНЫХ МАКЕТОВ

3.1 Эскизный проект

3.1.1 Эскизный проект указывает принципиальные конструкционные решения, дающих общее техническое представление о принципе работы. В дальнейшем эскизный проект дополняется деталями, необходимыми для решения поставленной задачи.

3.1.2 Схема массо-габаритного макета представляет собой мембрану диаметром 1625 миллиметров с отверстиями под крепёжные болты, а также расположенный перпендикулярно невесомый жесткий стержень с сосредоточенной массой приблизительно на расстоянии 4 метра от мембраны. Таким образом, регулированием двумя параметрами можно изменять характеристики системы, а именно расстоянием центра масс от основания и толщиной мембраны.

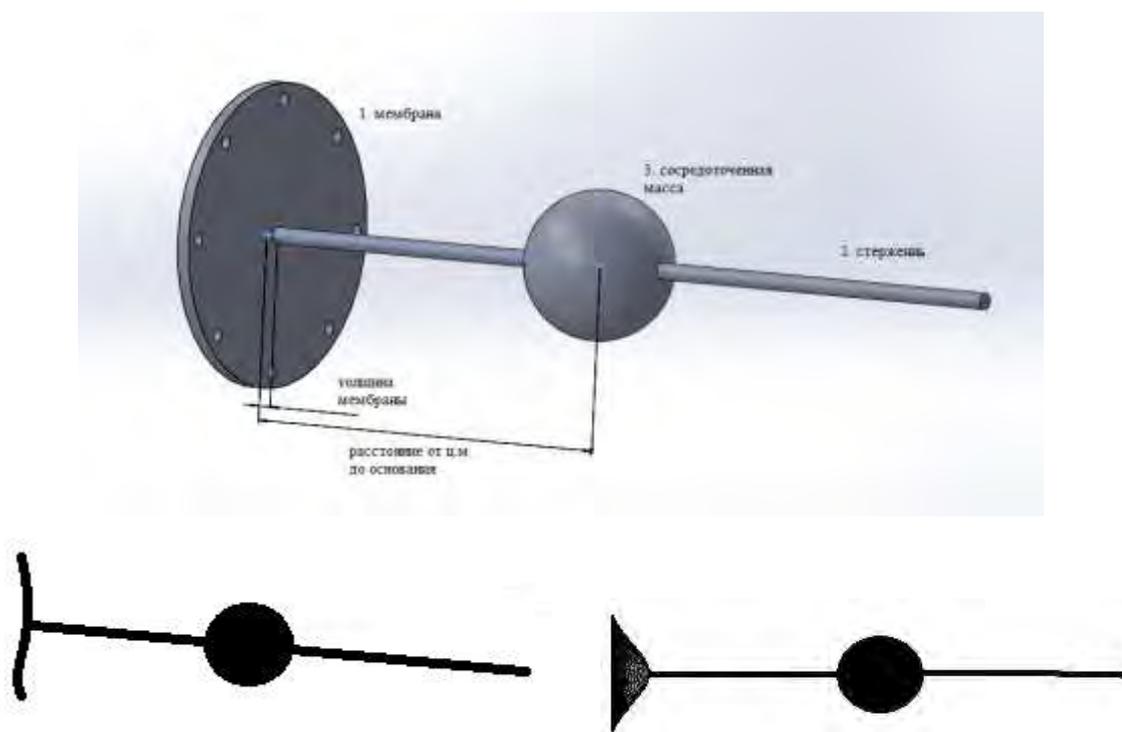


Рисунок 5 – Схема массо-габаритного макета спутника и интересующие формы колебаний

3.1.3 Чтобы понять, какие изменения происходят в механической системе в зависимости от регулирования параметров, были произведены «испытания» в конечноэлементном пакете. Сначала изменялась толщина мембраны при неизменном расстоянии центра масс от основания. Это позволило понять, как именно и с какой интенсивностью меняются

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата	150303.18.399.00.ПЗ ВКР				

собственные частоты механической системы. Толщина мембраны представляет собой интерпретацию жёсткости основания. Результаты представлены на графиках 1 и 2.

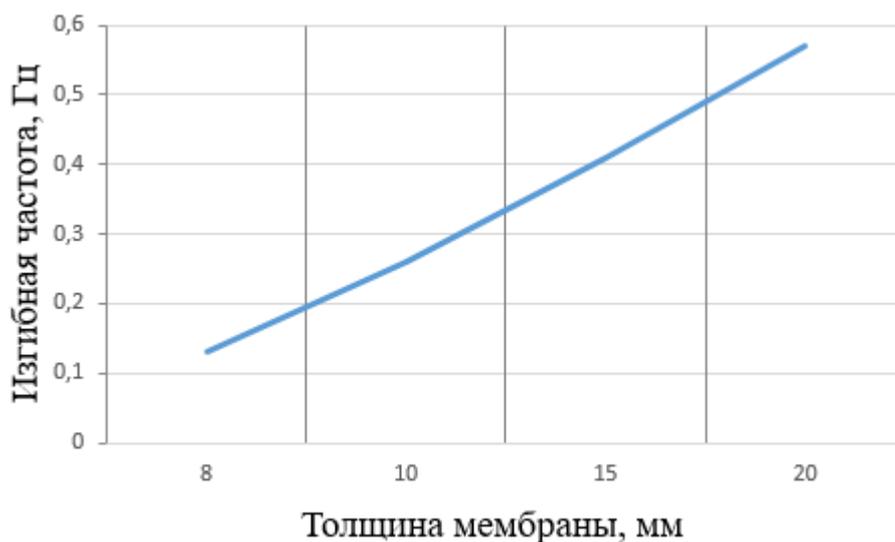


График 1 – Зависимость частоты изгибных колебаний системы при изменении толщины мембраны

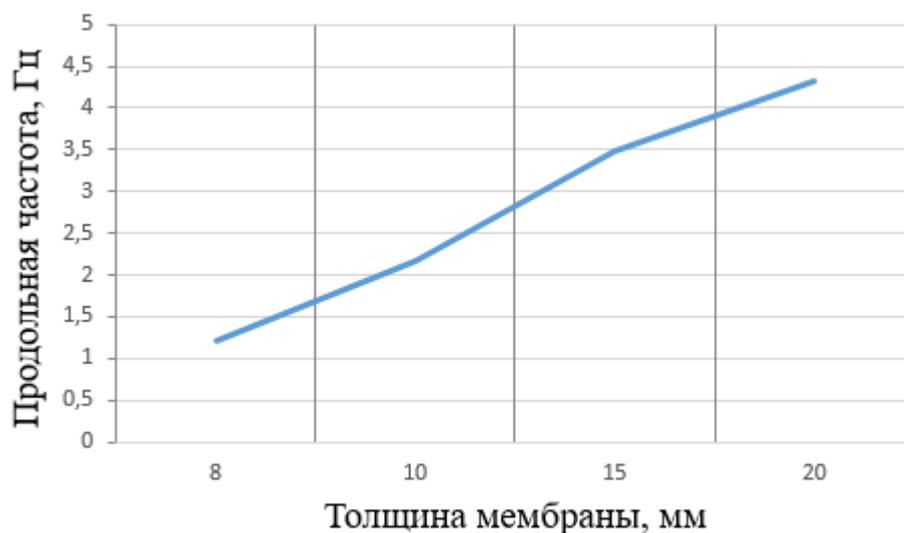


График 2 – Зависимость частоты продольных колебаний системы при изменении толщины мембраны

3.1.4 Изменение второго параметра, а именно изменение расстояния от центра масс до основания, позволит понять, как именно и с какой интенсивностью изменяются собственные частоты системы. Результаты представлены графиками 3 и 4.

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						10
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



График 3 – Зависимость частоты изгибных колебаний системы при изменении расстояния центра масс до основания



График 4 – Зависимость частоты продольных колебаний системы при изменении расстояния центра масс до основания

3.1.4 По результатам видно, что изменение расстояния от центра масс до основания, никак не влияет на изменение на продольные колебания механической системы. Продольные колебания по сравнению с изгибными менее чувствительны к изменениям параметров механической системы. То есть, для эффективного изменения собственных частот нужно изменять жёсткость основания. Эскизный проект дал представление о том, как ведёт себя механическая система при изменении двух важных параметров.

					150303.18.399.00.ПЗ ВКР	Лист	
						11	
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата			

3.2 Проектирование моделей

3.2.1 Построение детализированных массо-габаритных моделей производилось с помощью программы CAD-моделирования SolidWorks.

Были приняты допущения, что все болтовые соединения производились с достаточной затяжкой, чтобы считать места соединения в конструкции типа “bonded”. Крепёжный шпангоут вибростенда является абсолютно жёстким и неподвижным.

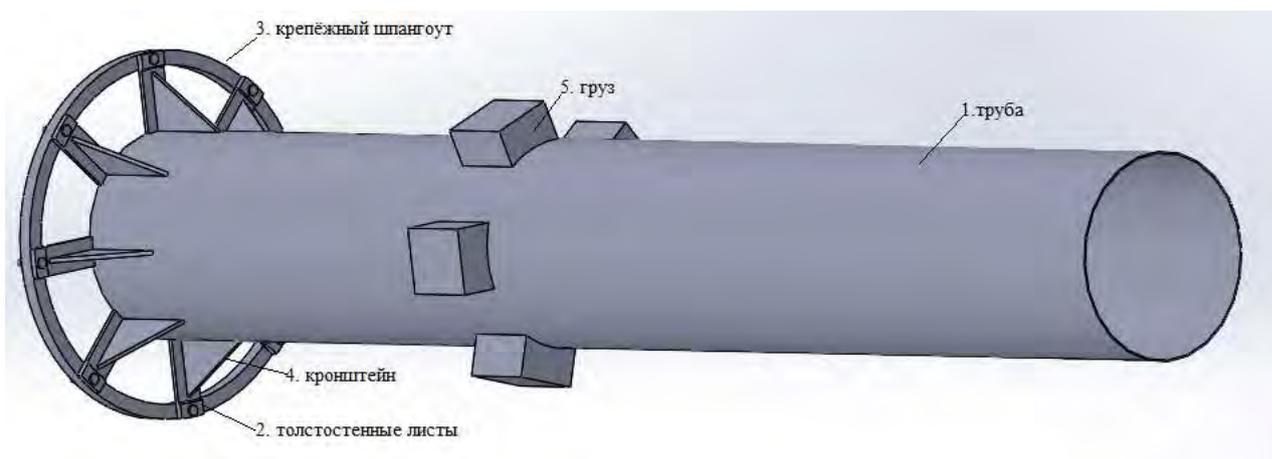


Рисунок 5 – Первый макет

Макет (рисунок 5) выполнен из прямошовной (одношовной) трубы (1) диаметром 1420мм с толщиной стенки 12 мм из стали Сталь3. В основании использовалась толстолистовая сталь 60x1500x6000 Сталь3 (2), листы крепятся болтовым соединением к крепёжному шпангоуту (3). Кронштейны 3x350x600 Сталь3 (4) соединяют основание с трубой. Сосредоточенные массы – грузы (5), расположенные на расстоянии 4 метра от основания, позволят изменять массу макета по усмотрению испытателей.

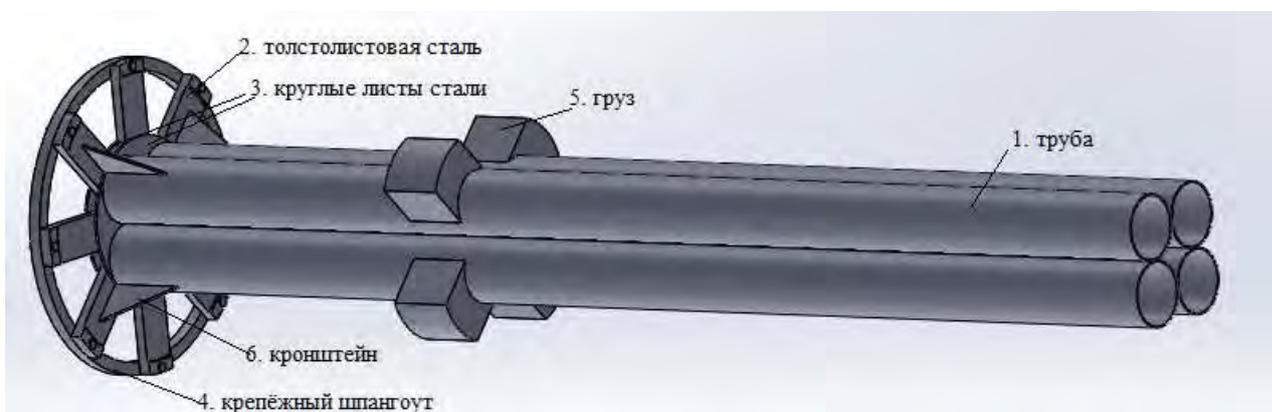


Рисунок 6 – Второй макет

									Лист
									12
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата	150303.18.399.00.ПЗ ВКР				

Второй макет (рисунок 6) выполнен из четырёх прямошовных (одношовных) труб (1) диаметром 530мм с толщиной стенки 12 мм из стали Сталь3. В основании использовалась толстолистовая сталь (2) 60x1500x6000 Сталь3 и круглые листы стали (3) диаметром 1280 мм. и толщиной 20 мм. Кронштейны (6) 3x350x600 Сталь3. Грузы (5), расположенные на расстоянии 4 метра от основания, позволят изменять массу макета по усмотрению испытателей.

3.2.2 Для расчёта макетов, подготовленных ранее, использовалась система ANSYS Workbench.

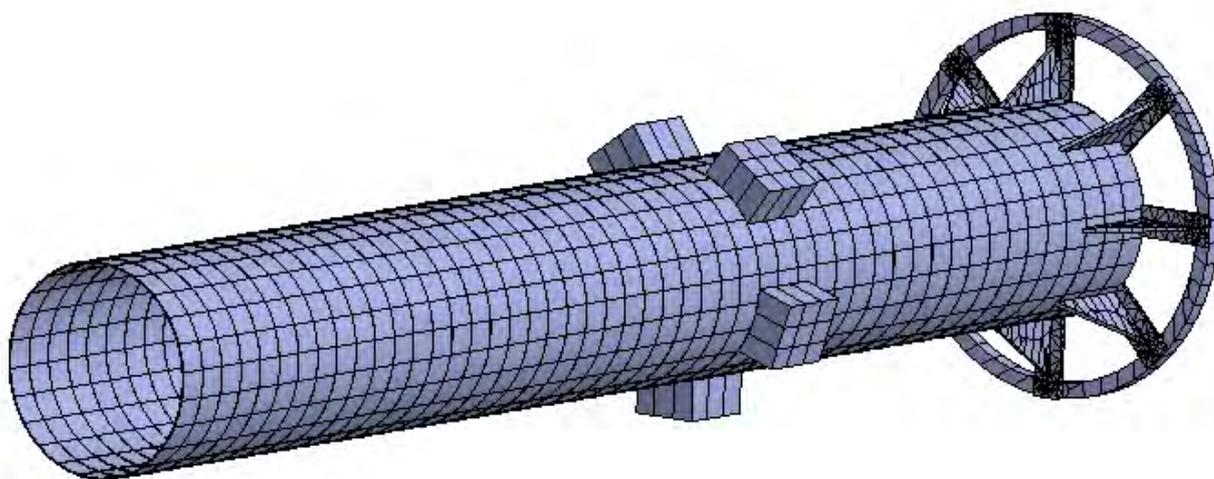


Рисунок 7 – Первый макет, разбитый на конечные элементы

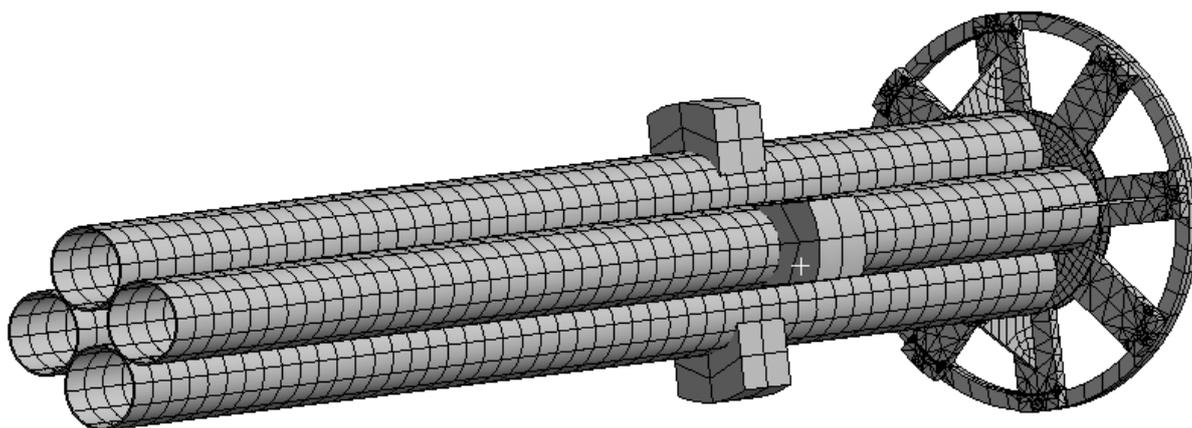


Рисунок 7 – Второй макет, разбитый на конечные элементы

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						13
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Сетка конечных элементов нанесена с помощью метода “MultiZone”, который обеспечивает автоматическое разделение геометрии на две группы геометрических тел: объемы, к которым может быть применен метод Sweep для построения гексасетки с протягиванием сеточных элементов вдоль некоторой оси, и остальные объемы, для которых по возможности будет построена гексасетка неструктурированного типа.

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>	
						14	
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			

3.3 Собственные изгибные и продольные частоты массо-габаритных макетов

3.3.1 Первый макет. Для нахождения изгибных и продольных частот было проведено исследование по нахождению собственных частот и форм механических систем.

На рисунке 8 изображена первая собственная форма, соответствующая изгибу механической системы. Деформации происходят с частотой 5,8 Герц.

A: Modal
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 5,8534 Hz
Unit: mm
21.06.2018 11:23

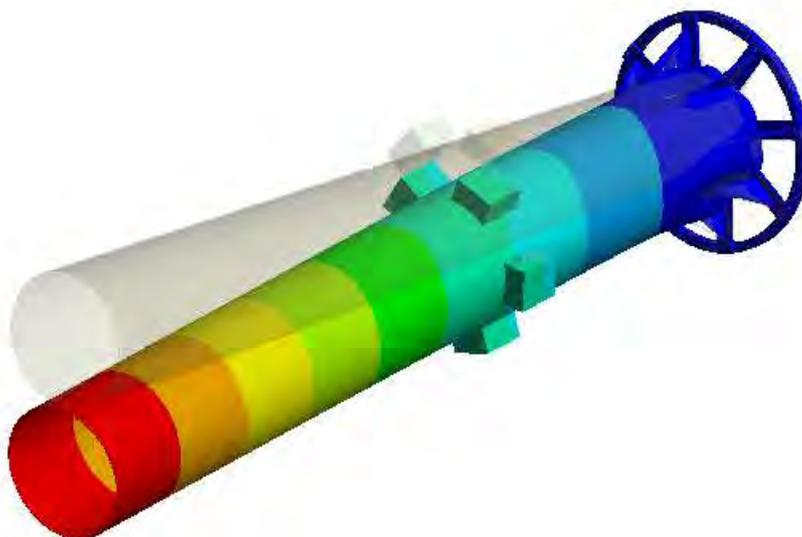
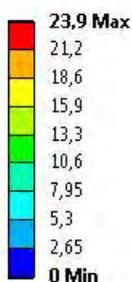


Рисунок 8 – Изгибные колебания при частоте 5,85 Герц

Также проведена проверка на сходимость результатов, путём уменьшения сетки (график 5). Анализ показал, что при размере конечного элемента близкому к нулю, изгибная частота составит 5,1 Герц.

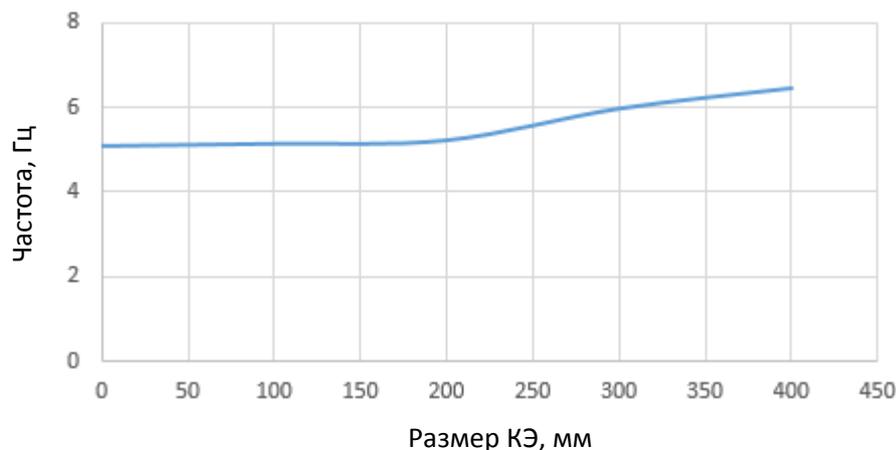


График 5 – Проверка на сходимость изгибных колебаний первого макета

									Лист
									15
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата	150303.18.399.00.ПЗ ВКР				

Продольные колебания первого ММГ (рисунок 10), соответствует двенадцатой собственной форме и равняются 36,9 Герц.

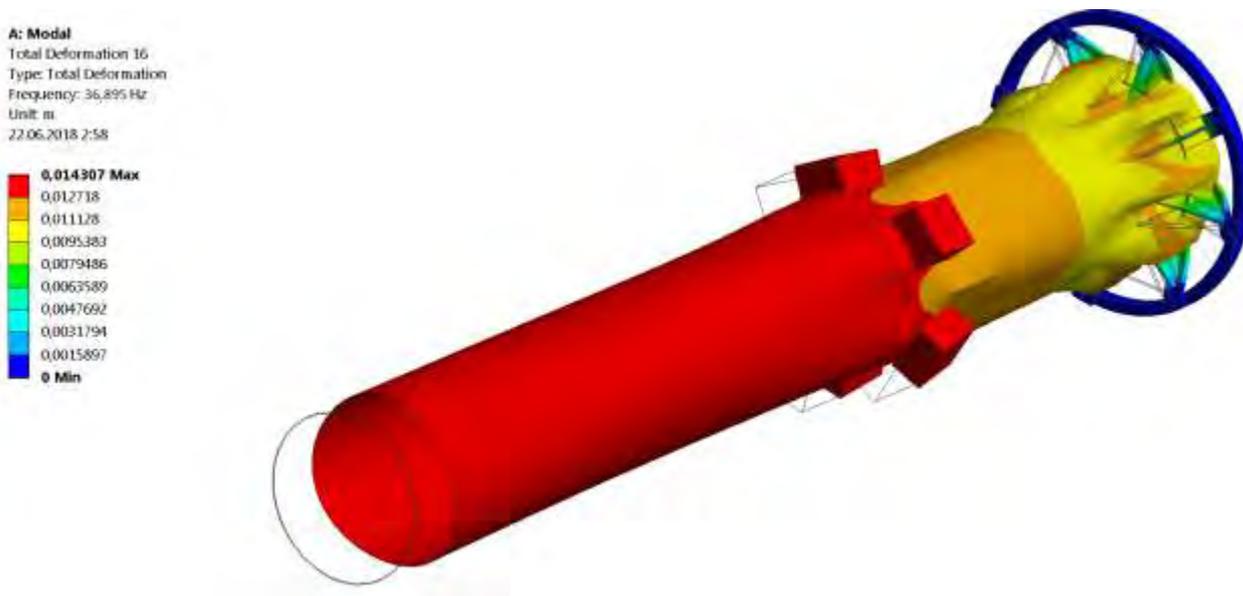


Рисунок 9 – Продольные колебания первого макета при 36,9 Герцах

Проверка на сходимость результатов показала, что при уменьшении размера конечного элемента продольная частота составит 30 Герц (график 6).

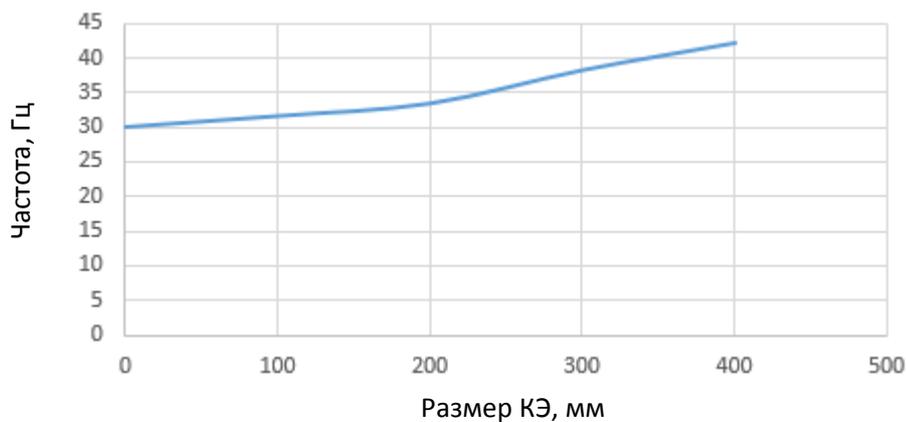


График 6 – Проверка на сходимость продольных колебаний первого макета

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						16
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

3.3.2 Второй макет. Изгибные колебания соответствуют первой собственной форме и составляют 4,68 Герц (рисунок10).

A: Modal
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 4,682 Hz
Unit: m
22.06.2018 3:29

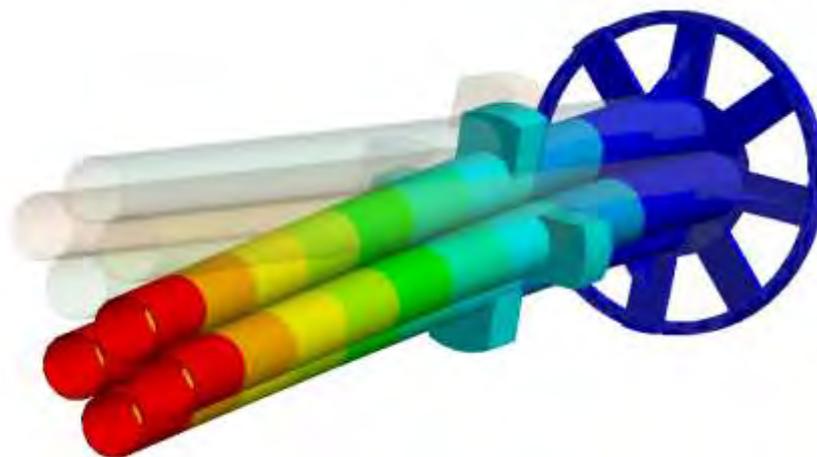
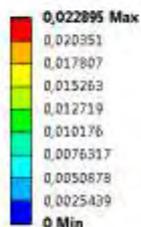


Рисунок 10 – Изгибная частота колебаний второго макета

Проверка показала, что изгибные колебания сойдутся в 4,6 Герцах при размере конечного элемента близкому к нулю (график 7).

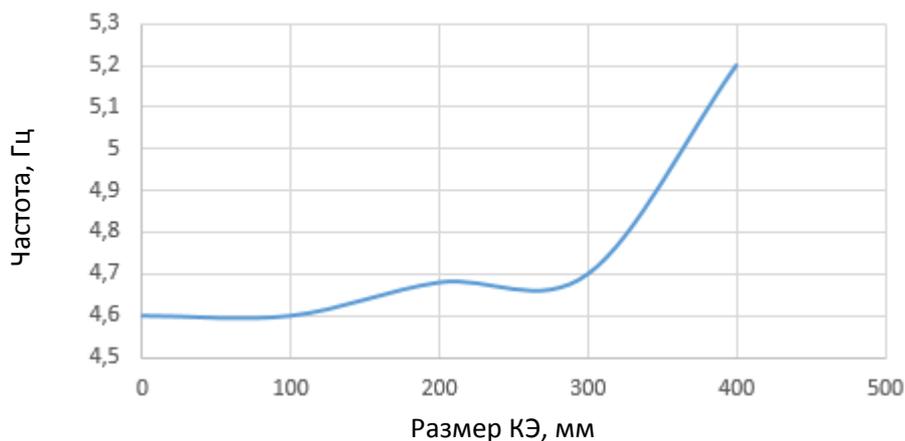


График 7 – Проверка на сходимость изгибных колебаний второго макета

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						17
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Продольные колебания соответствуют шестой собственной форме и составляют 35,4 Герц (рисунок 11).

A: Modal
 Total Deformation 7
 Type: Total Deformation
 Frequency: 35,445 Hz
 Unit: m
 22.06.2018 3:30

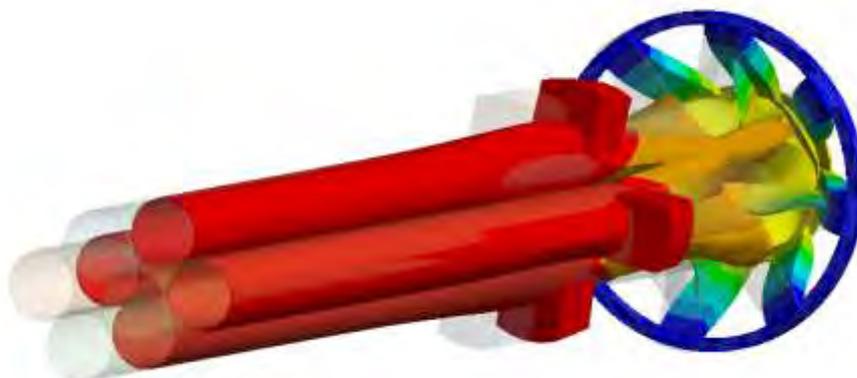
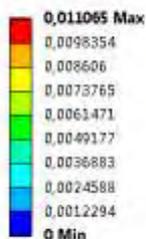


Рисунок 11 – Продольные колебания второго макета

Проверка на сходимость результата показала, что при уменьшении размера конечных элементов продольная частота составит 34,2 Герца (график 8).

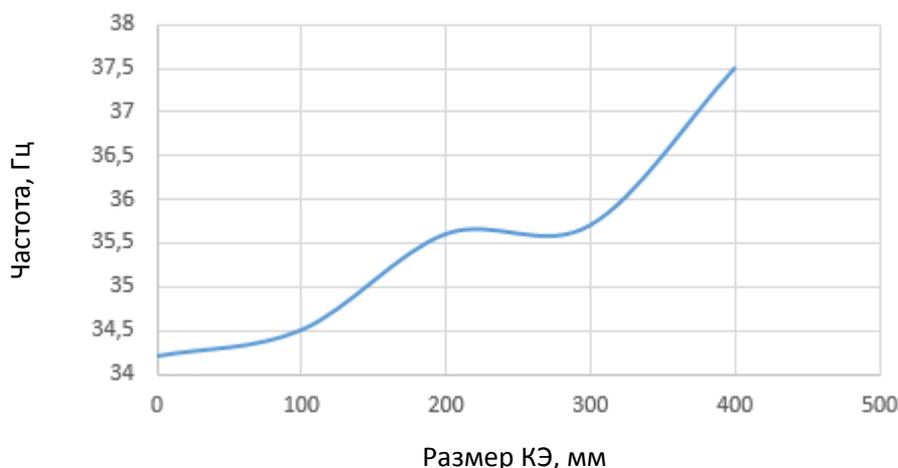


График 8 – Проверка на сходимость продольных колебаний второго макета

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						18
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

3.4 Исследование моделей на наличие пластических деформаций

3.4.1 Пластическая деформация наступает при превышении напряжениями предела текучести стали σ_B . Челябинский трубопрокатный завод предоставляет трубы диаметром 530 миллиметров и 710 миллиметров, выполненных из Сталь3. Сталь3 – углеродистая сталь, которая используется при производстве электросварных труб общего назначения. Предел текучести у таких сталей равен 380 МПа. В зависимости от типа сварки сталь ослабляется и предел текучести в таких случаях уменьшается.

$$\sigma_B = 380 \cdot 10^6 \cdot 0,8 = 304 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (1)$$

В данном случае эквивалентные напряжения не должны превышать 304 МПа в местах сварки и 380 МПа во всех остальных случаях.

3.4.2 **Первый макет.** Первый ММГ, испытывая перегрузки в 2g, достигает максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в месте соединения кронштейна и основания, выполненного из толстолистовой стали (2). Напряжения не превышают предел текучести для сварки рисунки 11 и 12.

$$299 \cdot 10^6 < 304 \cdot 10^6 \quad (2)$$

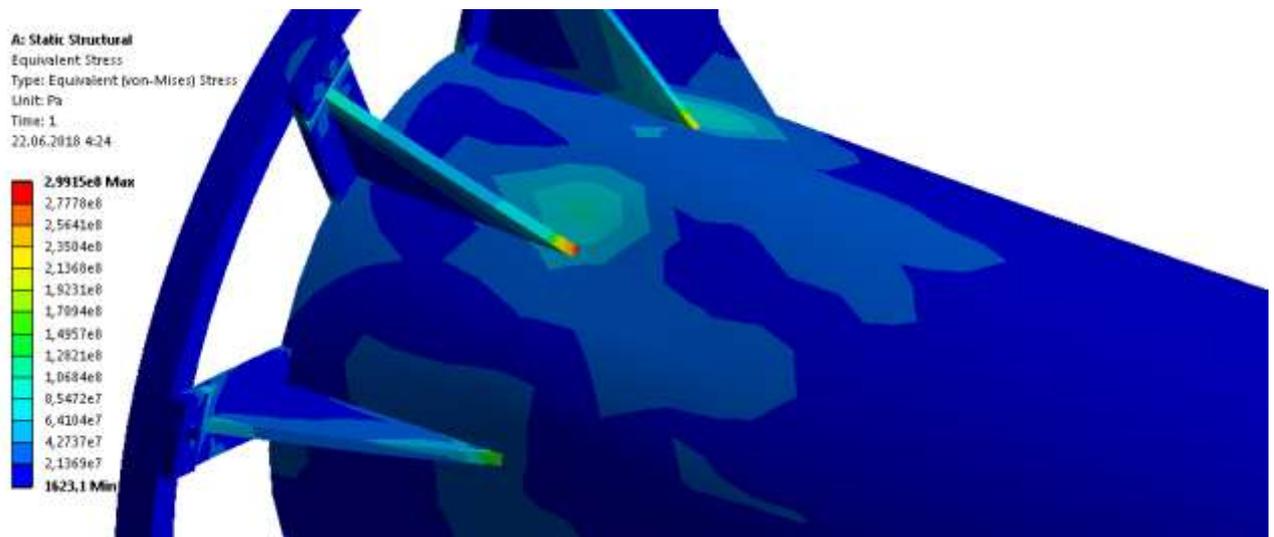


Рисунок 11 – Место крепления кронштейна (4) к основанию (2)

									Лист
									19
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата	150303.18.399.00.ПЗ ВКР				

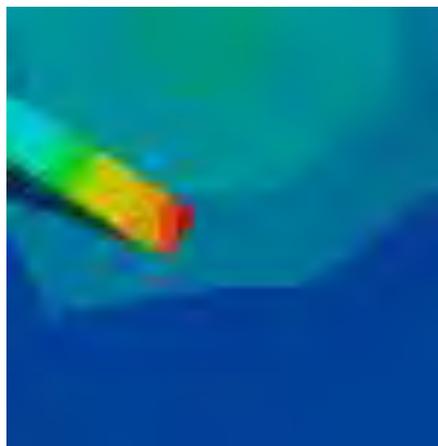


Рисунок 12 – Концентратор напряжений

3.4.3. Второй макет. Во втором макете место предполагаемого места максимума эквивалентных напряжений находится на соединении кронштейна (6) к трубе (1) 3.2.1.

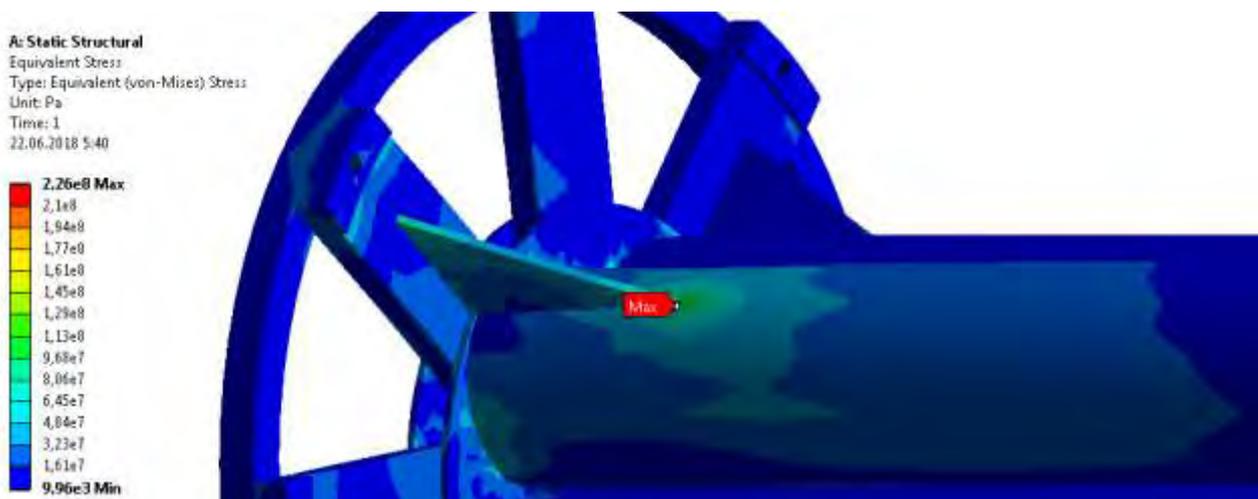


Рисунок 13 – Место крепления кронштейна (6) к трубе (1)

На рисунке 14 видно, что максимум эквивалентных напряжений меняется от среднего напряжения в 10 раз мгновенно. Что в свою очередь сигнализирует о том, что

					150303.18.399.00.ПЗ ВКР	Лист	
						20	
Изм.	Лист	№ Докум.	Подпись	Дата			

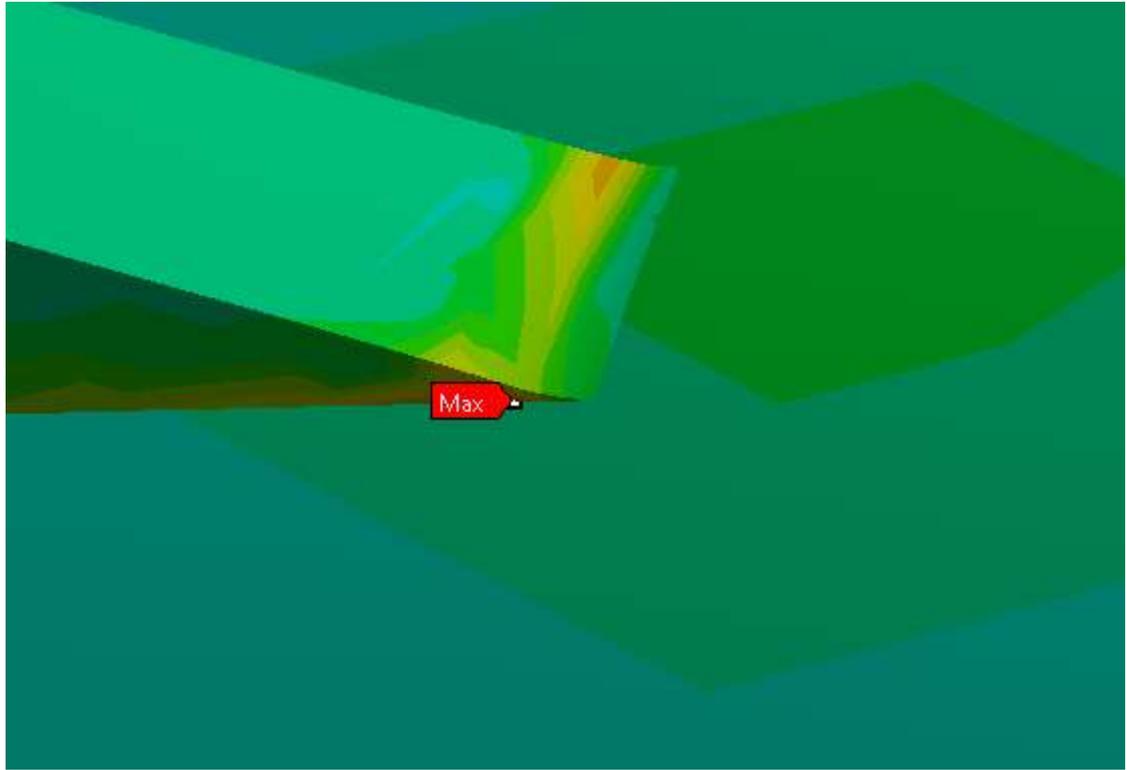


Рисунок 14 – Концентратор напряжений

В расчётах следует следить за близостью размеров КЭ в сопрягаемых деталях. Поэтому данные цифры следует считать приближенными, требующими уточнения.

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>	
						21	
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5.1 Выполненная работа

5.1.1 В процессе выполнения выпускной квалификационной работы было спроектировано два массо-габаритных макета, соответствующих требованиям.

Выполнены следующие основные работы:

1. Рассмотрена актуальность темы, посвящённой подготовке испытательного оборудования к моделированию вибрационных воздействий на спутник.
2. Исследовано влияние на динамические характеристики механической системы входящих в неё параметров с помощью упрощенной модели.
3. Проведена работа по проектированию двух массо-габаритных макетов спутника, соответствующих заявленным требованиям.
4. Проведены корректировки механических систем для соответствия требованию (б) **2.2.1**.
5. Оценены стоимость и трудоёмкость изготовления каждого из макетов, а также их индивидуальные преимущества.

Дальнейшее развитие работ следует вести в направлении:

- проведения поверочных расчётов ММГ;
- исследования, направленного на возможное упрощение ММГ;
- рассмотрения, более детально, места крепления макета к крепёжному шпангоуту.

					<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						23
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ММГ – макет массо-габаритный;

РН – ракета носитель;

СФ – собственные формы;

СЧ – собственные частоты;

ЦМ – центр масс;

						<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	<i>24</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Список использованной литературы

1. Андронов А.А. Теория колебаний/ – 919с.
2. Григолюк Э.И. устойчивость оболочек / Э.И. Григолюк, В.В. Кабанов // наука – 1978. – 126 – 132с.
3. Бидерман В.Л.. Теория механических колебаний. Москва «Высшая школа» 1980. – 405с.
4. Алфутов Н.А. основы расчётов на прочность упругих систем. / Н.А. Алфутов// машиностроение – 1987. – 258с.

						<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>150303.18.399.00.ПЗ ВКР</i>	25