

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой,  
д.т.н., профессор  
\_\_\_\_\_ А.Л. Шестаков  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

## **РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРПУСОВ И КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 372. ВКР

Консультант, доцент  
\_\_\_\_\_ / Д.А. Кацай /  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Руководитель проекта,  
старший преподаватель  
\_\_\_\_\_ / С.В. Пашнин /  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор работы  
студент группы КЭ-464  
\_\_\_\_\_ / Р.Р.Хасанов /  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент  
\_\_\_\_\_ / А.А. Лысова /  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019

## АННОТАЦИЯ

Хасанов Р.Р. Разработка стенда для исследования корпусов и корпусных деталей. — Челябинск: ЮУрГУ, КЭ–464, 60 с., 51 илл., библиогр. список — 23 наим., 5 прил.

В выпускной квалификационной работе выполнено проектирование стенда для исследования свойств корпусов и корпусных деталей. Разрабатываемый стенд предназначен для оценки жесткостных свойств корпусных элементов. В работе использован датчик линейных перемещений для измерения прогиба корпусных деталей.

Составлена математическая модель изгиба балки, проведены частотный и статический анализы для пластин. Разработан пакет конструкторской документации, разработан порядок проведения лабораторной работы на стенде.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 372. ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб</i>		Хасанов Р.Р.			Разработка стенда для исследования свойств корпусов и корпусных деталей	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Пашнин С.В.				5	16	
<i>Н. Контр.</i>		Лысова А.А.				ЮУрГУ Кафедра ИНИТ		
<i>Утв.</i>								

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ .....	9
1.1. Анализ технического задания .....	9
1.2. Обзор аналогов и патентный поиск.....	10
1.3. Принципы измерения жесткости со статической нагрузкой .....	12
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА.....	14
2.1. Расчёт моментов инерции для балок различной формы сечения .....	14
2.2. Расчёт прогиба исследуемого объекта. ....	15
2.3. Моделирование изгиба с помощью Mathcad. ....	18
2.4. Моделирование в среде SolidWorks simulation.....	21
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ СТЕНДА .....	40
3.1. Формирование нижней корпусной детали.....	40
3.2. Формирование опоры для исследуемого объекта .....	41
3.3. Формирование механизма перемещения датчика Capandt 6019.....	41
3.4. Формирование механизма для создания нагрузки.....	47
3.5. Датчик Capandt 6019.....	47
3.6. Формирование блока управления механизмом перемещения. ....	49
3.7. Руководство по эксплуатации .....	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	55
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Стенд для исследования корпусов и корпусных деталей. Спецификация, сборочный чертеж, детализация .....	56

## ВВЕДЕНИЕ

К корпусным относят детали, определяющие взаимное расположение узла и воспринимающие основные силы, действующие в устройстве. Корпусная деталь состоит из стенок, ребер, бобышек, фланцев, приливов и других элементов, объединенных в единое изделие. Корпус является базовой деталью и при его проектировании необходимо удовлетворить требованиям к прочности, жесткости и герметичности. Прочность и жёсткость корпуса обеспечиваются выбором материала корпуса, надлежащей толщиной стенок и ребрами жесткости, располагаемыми у опорных узлов.

Корпусные детали является неотъемлемой частью приборостроения. Корпусные детали способствуют стабильной работе прибора. Благодаря корпусным деталям, прибор защищён от воздействия внешней среды, например, влаги, пыли. Немаловажной проблемой является решение вопроса о виброустойчивости. Вибрация, возникающая внутри прибора, может нарушать работу устройства, в следствие чего прибор будет выводить неверные данные. Для того, чтобы уменьшить риск возникновения вибраций, корпусам и корпусным деталям повышают жёсткость.

Жёсткость — это способность конструктивных элементов сопротивляться деформации при внешнем воздействии.

Это одно из важнейших условий для проектирования корпусных деталей приборов. При недостатке жёсткости внутренние составляющие устройства будут испытывать неблагоприятные воздействия в процессе работы, к примеру, вибрационные нагрузки.

Распространённым способом увеличения жёсткости является введение ребер жесткости в конструкцию.

Ребра жесткости — конструктивные элементы, способствующие снижению нагрузки на участок элемента, путём принятия нагрузки на себя. Они позволяют уменьшить размер сечений детали, способствуют снижению внутренних напряжений в элементе. Так же ребро придаёт большую устойчивость к деформированию при возникновении внешней нагрузки.

Целью данной выпускной квалификационной работы является проектирование лабораторного стенда для изучения свойств корпусных деталей на примере различных балок, состоящих из различного материала, имеющих отличную друг от друга толщину, а также, имеющих различные рёбра жёсткости. Ребра имеют различную форму, расположение.

К задачам проекта относятся:

- обзор аналогов и патентов;
- описание конструкции и принцип работы установки;
- создание конструкторской документации стенда.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 372. ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		8

# 1. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## 1.1. Анализ технического задания

В техническом задании, установлены следующие требования:

- малая стоимость;
- не выходящие за пределы стенда габариты;
- электропитание стенда от стандартной сети 220 вольт, 50 Гц;
- наглядность изучаемого процесса;
- использование микроконтроллера;
- съемная разрабатываемая часть;
- пособие с описанной методикой проведения работы.

На кафедре «Информационно измерительная техника» имеется лабораторный комплекс «Метрология. Датчики линейных перемещений». Данный стенд имеет в своём составе конденсаторный датчик линейных перемещений, а также съёмную рамку для его крепления. В данной работе разработана новая рамка, которая включает в себя данный датчик.

В работе используется два шаговых двигателя для реализации двухосевого механизма перемещения датчика линейных перемещений. Так же понадобится дополнительный блок питания с напряжением 5 вольт для микроконтроллера.

Все действия, которые будут проводится в ходе работы просты, а также всё, что происходит с исследуемыми объектами наглядно. Для проведения работы была разработана методика.

## 1.2. Обзор аналогов и патентный поиск

Рассмотрена установка для определения линейных и угловых перемещений поперечных сечений статически определимой балки ТМт 12М. В данной установке исследуются линейные, а также угловые перемещения нагружаемой балки. Нагрузка создаётся с помощью груза, подвешенного на креплении к балке [1]. Установку можно увидеть на рисунке 1.



Рисунок 1 – Установка для определения линейных и угловых перемещений поперечных сечений статически определимой балки ТМт 12М

Линейные перемещения и углы поворота измеряются с помощью индикаторов часового типа ИЧ-10.

К недостаткам данной установки можно отнести отсутствие микроконтроллера, с помощью которого можно было бы точнее снимать значения угловых и линейных перемещений исследуемого объекта.

Рассмотрен *тестер жесткости Taber model 150-B*, внешний вид которого виден на рисунке 2.

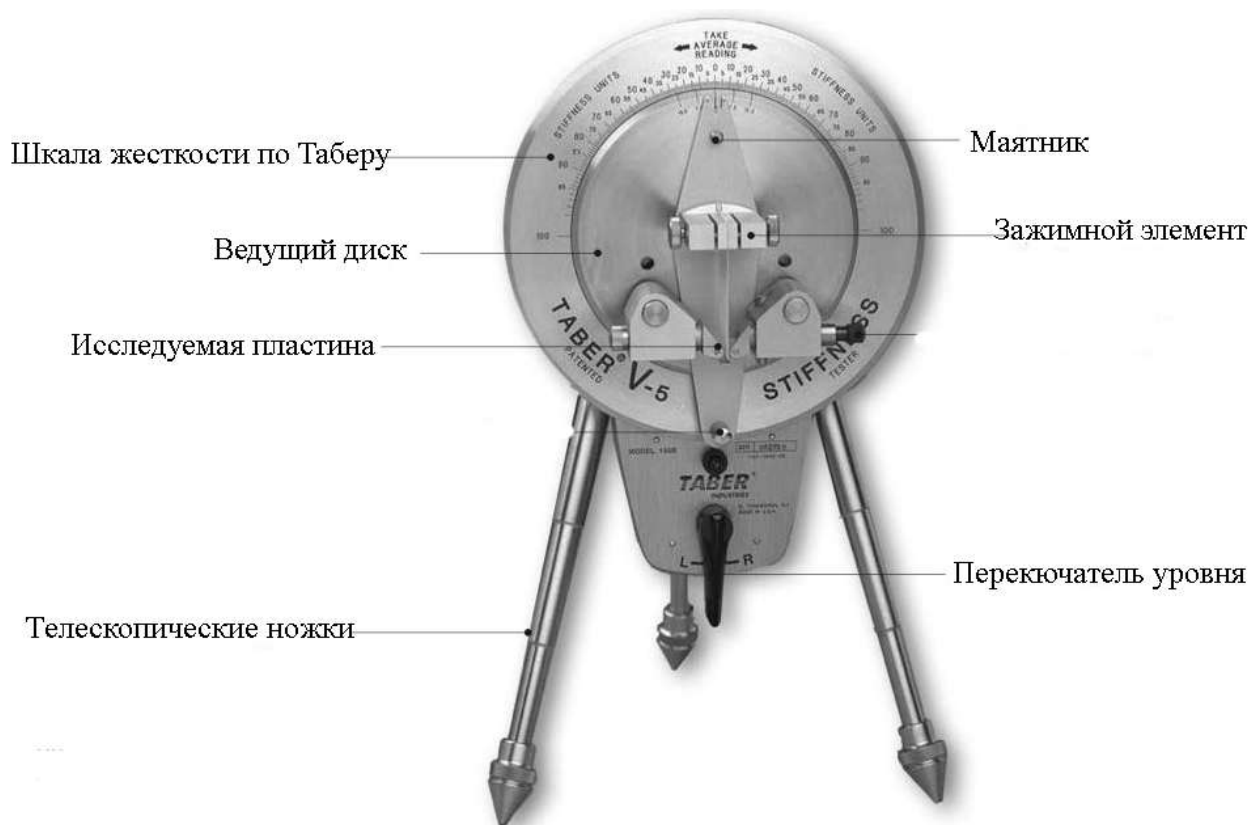


Рисунок 2 – Taber model 150-B

Тестер жесткости Taber использует маятник двухстороннего типа. Система оценивает жесткость материала на изгиб, свойства упругости и эластичности. Сила прикладывается к нижнему концу образца с помощью пары роликов, прикрепленных к диску. Результирующий крутящий момент отклоняет маятник от его вертикального положения и значение единицы жесткости по Таберу ( $\text{г} \cdot \text{см}$ ) берется, когда метка маятника совпадает с соответствующей меткой диска привода. Предопределенная длина образца, угол отклонения и скорость нагрузки обеспечивает точные и воспроизводимые результаты испытаний [2]

К недостаткам данной установки можно отнести отсутствие точного съема данных. Показания снимаются пользователем со шкалы жёсткости. Так же к недостаткам относится невозможность закрепить сравнительно большие по

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



габаритам объекты. В установку возможно поместить только небольшие пластины.

Найден *Патент 478204*. Способ измерения жесткости упругих элементов. Алдонов Леонид Григорьевич [3].

Известен способ определения жесткости упругих элементов или систем, заключающийся в том, что упругий элемент или систему нагружают плавно или ступенчато возрастающим усилием, измеряют приращение усилия и соответствующее ему приращение деформации упругого элемента, а затем вычисляют жесткость, как отношение приращения усилия к приращению деформации упругого элемента или как отношение текущих значений усилия и деформации.

Однако при использовании известного способа можно получить лишь дискретные значения жесткости в первом случае и большие погрешности при непрерывном делении величины усилия на величину деформации, когда жесткость является нелинейной функцией.

Цель изобретения — повышение точности измерений.

Это достигается тем, что контролируемый упругий элемент деформируют с постоянной скоростью и регистрируют производную усилия по времени.

### 1.3. Принципы измерения жесткости со статической нагрузкой

Основным принципом измерения является наблюдение за элементом с помощью его нагрузки какой-либо силой. К исследуемому объекту прикладывается нагрузка, под действием которой исследуемый элемент корпуса деформируется. Принципиальную схему патента можно увидеть на рисунке 3.

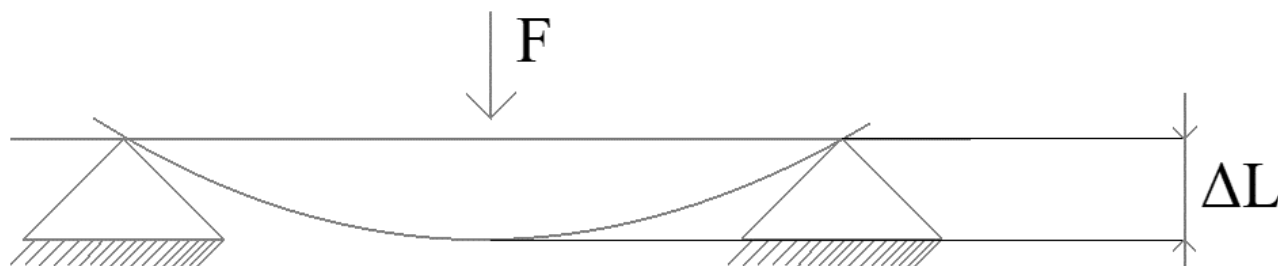


Рисунок 3 – Принципиальная схема способа

В ходе выполнения эксперимента фиксируются следующие величины:

— деформация исследуемого элемента;

— сила, прикладываемая к определённой точке исследуемого элемента.

Жесткостью будет являться отношение приращения силы  $\Delta F$ , отсчитываемой от нулевой точки, к приращению перемещения  $\Delta h$  исследуемого элемента. Данная зависимость выглядит следующим образом:

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta h},$$

где  $K$  — жесткость исследуемого элемента;

$\Delta F$  — приращение силы;

$\Delta h$  — приращение перемещения.

В ходе проведения измерения есть возможность получить график, наглядно отображающий зависимость силы, прикладываемой к исследуемому образцу от перемещения.

**Выводы по разделу один:** в ходе проведения информационного поиска было найдено два аналога разрабатываемой установки.

Установка для определения линейных и угловых перемещений поперечных сечений статически определимой балки ТМт 12М. К недостаткам данной установки можно отнести отсутствие микроконтроллера, с помощью которого можно значений угловых перемещений и линейных перемещений исследуемого объекта. Так же нагрузка создаётся грузом, для точного измерения его веса потребуется дополнительное оборудование в виде точных весов.

Установка Taber model 150-B. К недостаткам данной установки можно отнести отсутствие микроконтроллера, с помощью которого можно было бы точнее снимать значения угловых и линейных перемещений исследуемого объекта.

Был найден патент Патент 478204. Способ измерения жесткости упругих элементов. В патенте описывается способ измерения жёсткости, что позволяет оценить жесткость того или иного исследуемого объекта.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА

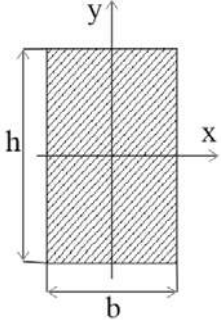
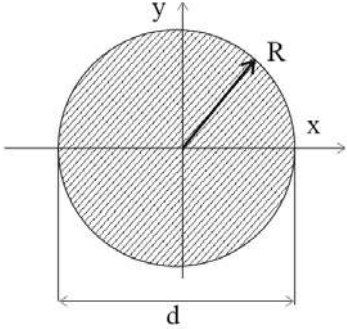
При расчете исследуемого элемента на изгиб одним из важнейших параметров является момент инерции.

**Момент инерции** — величина, характеризующая распределение масс в теле и являющаяся наряду с массой мерой инертности тела при непоступательном движении [9].

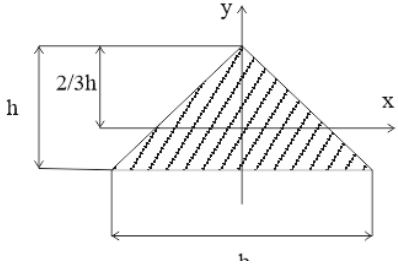
### 2.1. Расчет моментов инерции для балок различной формы сечения

В таблице 1 приведены формулы для расчета моментов инерции сечений фигур различной формы [10]:

Таблица 1 – Моменты инерции тел различного сечения

Моменты инерции тел различного сечения			
Форма сечения	$J_x$	$J_y$	$J_{zx}$
	$\frac{bh^3}{3}$	$\frac{b^3}{3}$	$\frac{b^2h^2}{4}$
	$\frac{\pi d^4}{64} = 0.05d^2$		0

Окончание таблицы 1

Моменты инерции тел различного сечения			
Форма сечения	$J_x$	$J_y$	$J_{zx}$
	$\frac{bh^3}{36}$	$\frac{hb^3}{48}$	0
	$r^4 \left( \frac{\pi}{8} - \frac{\pi}{9\pi} \right)$ $= 0.11r^4$	$\frac{\pi r^4}{8}$	0

**2.2. Расчёт прогиба исследуемого объекта.**

На рисунке 4 представлена схема нагружения балки по центру [9]:

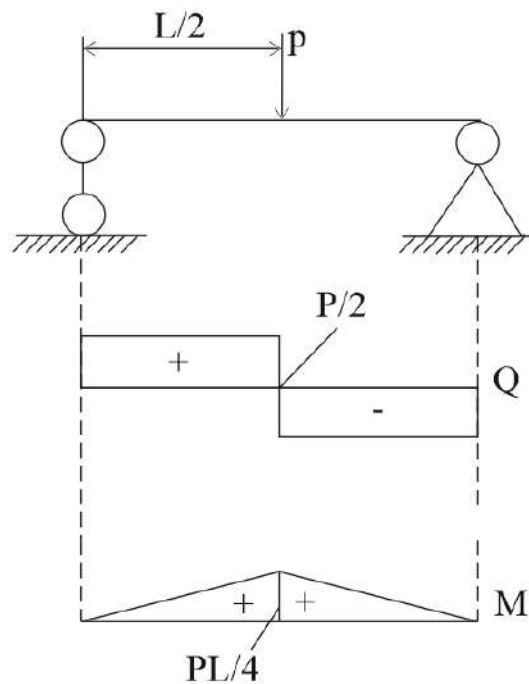


Рисунок 4 – Схема нагружения балки в центре

Реакции в опорах:

$$R_A = R_B = \frac{P}{2},$$

где  $P$  – сила нажатия на балку.

Поперечная сила:

$$Q_I(x) = \frac{P}{2},$$

где  $P$  – сила нажатия на балку.

Прогиб:

$$v = \frac{PL^3}{48EJ},$$

где  $L$  – длина балки;

$E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена балка;

$J$  – момент инерции сечения балки.

На рисунке 4 представлена схема нагружения балки в произвольной точке.

Реакции в опорах:

$$R_A = \frac{Pb}{L};$$

$$R_B = \frac{Pa}{L},$$

где  $P$  – сила нажатия на балку;

$b$  – расстояние от правого края балки до точки приложения силы;

$a$  – расстояние от левого края балки до точки приложения силы.

Прогиб:

$$v = \frac{Pa^2b^2}{3EJL},$$

где  $a$  – расстояние от левого края балки до точки приложения силы;

$b$  – расстояние от правого края балки до точки приложения силы;

$L$  – длина балки;

$E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена балка;

$J$  – момент инерции сечения балки.

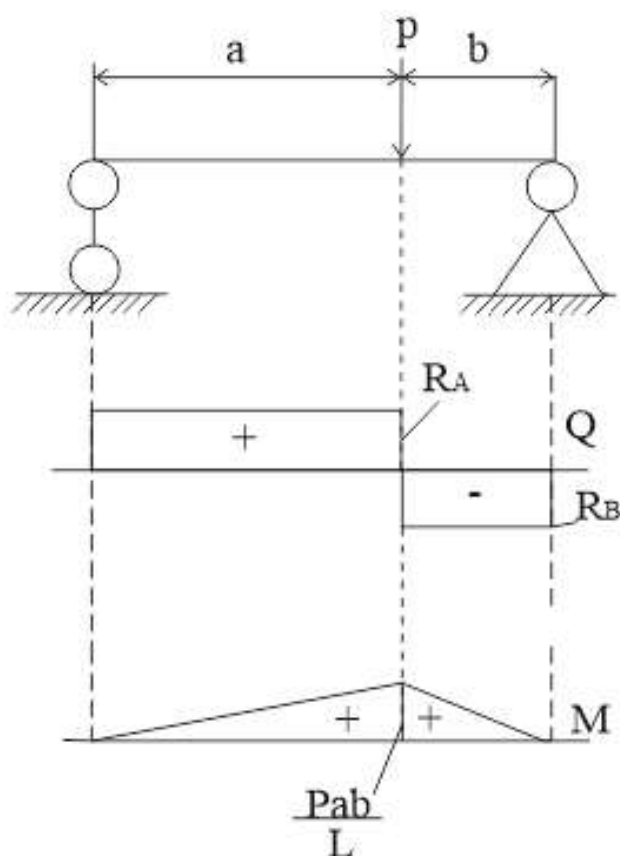


Рисунок 5 – Схема нагружения балки в произвольной точке

Для свободно опертой балки с несимметричной нагрузкой (Рисунок 6) [11].

Максимальный прогиб:

$$v = \frac{Fa}{48EJ_x} \cdot (3l^2 - 4a^2),$$

где  $a$  – расстояние от левого края балки до точки приложения силы;

$L$  – длина балки;

$E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена балка;

$J$  – момент инерции сечения балки.

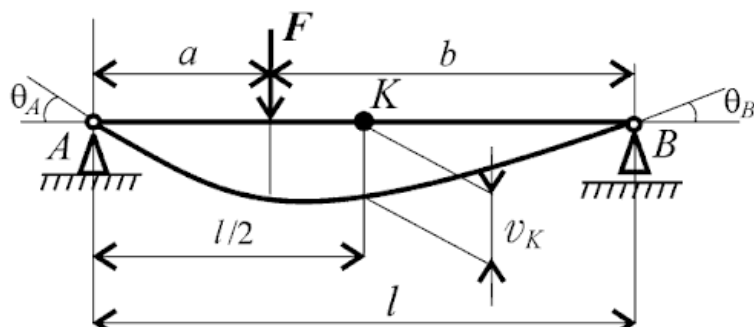


Рисунок 6 – Схема несимметричного нагружения свободно опертой балки

### 2.3. Моделирование изгиба с помощью Mathcad.

Пользуясь формулами, приведёнными выше, рассчитаем значения в среде MathCad.

Mathcad - [Мат.модель]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$h := 5 \text{ mm}$$
$$t := 5 \text{ mm}$$
$$J := \frac{h^2 \cdot t^2}{4} = 156.25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad \text{момент инерции балки}$$
$$P := 15 \text{ Н} \quad \text{нагрузка}$$
$$E := 2 \times 10^5 \text{ Па} \quad \text{модуль упругости материала}$$
$$L := 200 \text{ мм} \quad \text{Длина балки}$$
$$a := 100 \text{ мм} \quad \text{Расстояние a}$$
$$b := 100 \text{ мм} \quad \text{Расстояние b}$$
$$v := \frac{P \cdot a^2 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot J \cdot L} = 0.08 \text{ мм} \quad \text{Прогиб}$$

Построим график, отображающий прогиб балки в определённой её точке от края (Рисунок 7). Балка длиной 200 мм и сечением 5x5 мм. Нагрузку примем равной 15 Н.



Рисунок 7 — График прогиба балки 5x5 мм

Из графика видно, что максимальная деформация наблюдается в центре балки.

График зависимости силы нажатия на центральную точку балки от её прогиба представлен на рисунке 8:

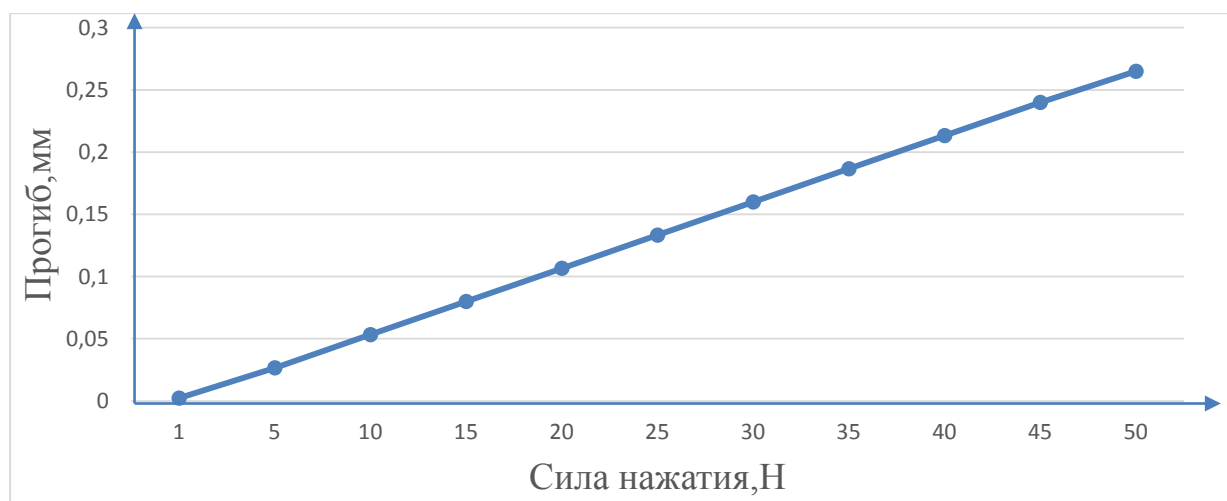


Рисунок 8 — Зависимость изгиба балки от силы нажатия



Построим график, отображающий прогиба балки в определённой её точке от края (Рисунок 9). Балка длиной 200мм и сечением 1x1 мм. Нагрузку примем равной 15 Н.

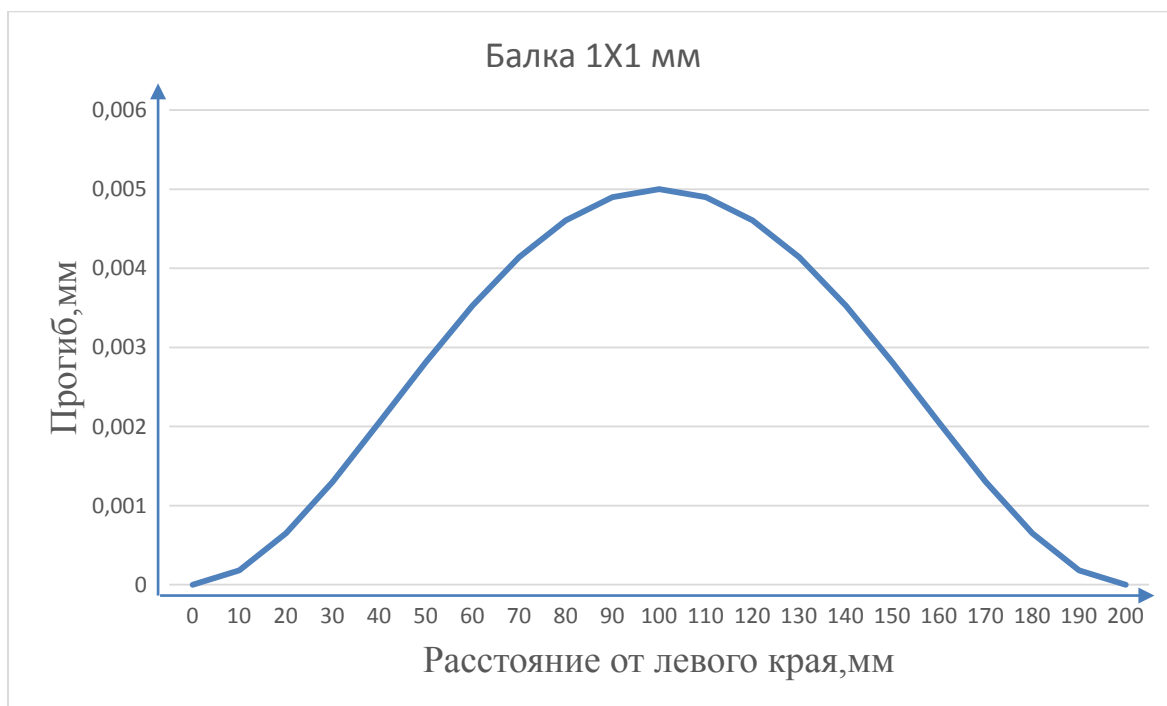


Рисунок 9 — График прогиба балки 1x1 мм

График зависимости силы нажатия на центральную точку балки от её прогиба представлен на рисунке 10:

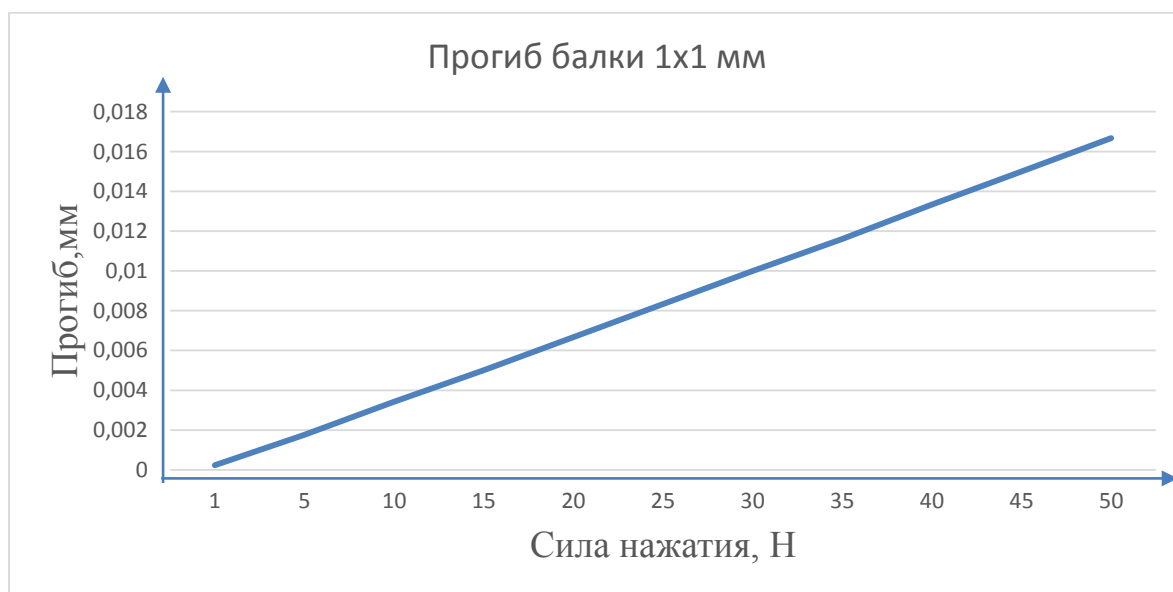


Рисунок 10 — Зависимость изгиба балки от силы нажатия

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

## 2.4. Моделирование в среде SolidWorks simulation.

Во второй части проводимой работы исследуются пластины, как части корпусных деталей. Для примера будем использовать пластину размером 100x200 мм с четырьмя отверстиями диаметром 6 мм, для её крепежа. Толщина пластины равна 3 мм.

Запустим частотное исследование в прикладном пакете SolidWorks Simulation, для нахождения собственных (резонансных) частот пластин.

С помощью элемента «Зафиксированная геометрия» закрепим исследуемый объект в четырех точках, а также применим материал: сплав алюминия 1060. Внешний вид детали можно увидеть на рисунке 11.

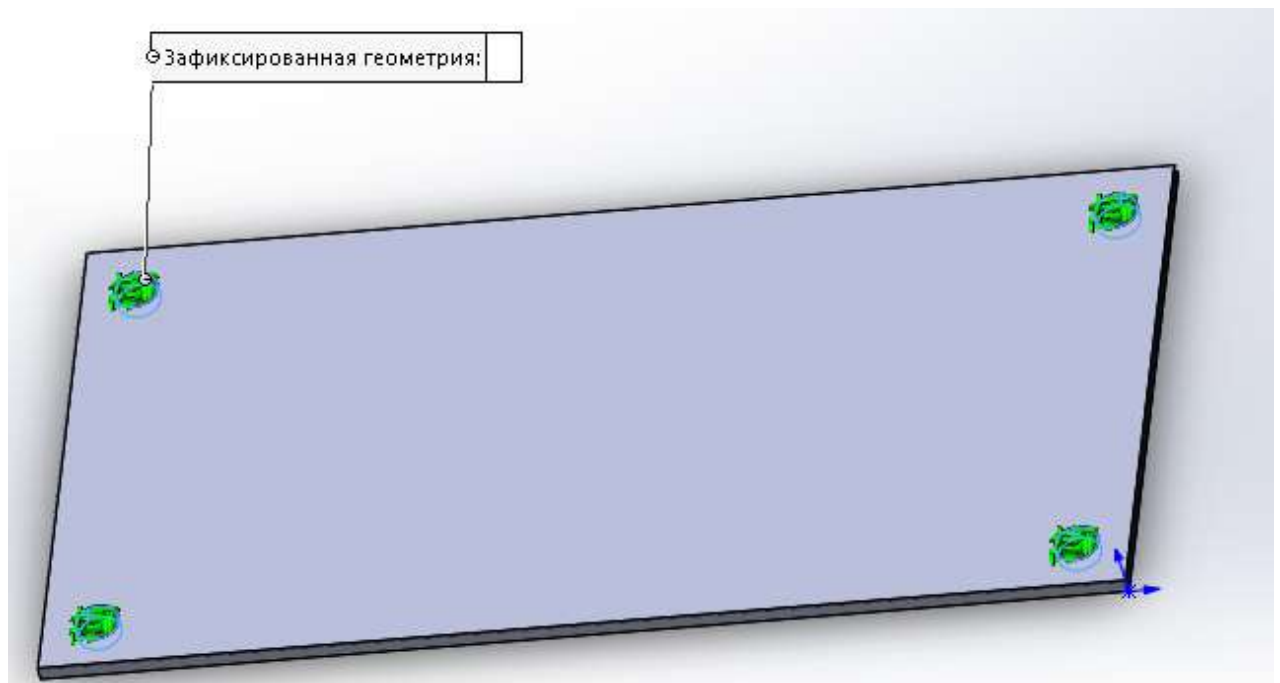


Рисунок 11 – Исследуемый объект с закреплением

Запустим частотный анализ. В результате исследования были получены пять резонансных частот:

**Частота 1 – 459.89 Гц.**

Результат моделирования увидеть на рисунке 12.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

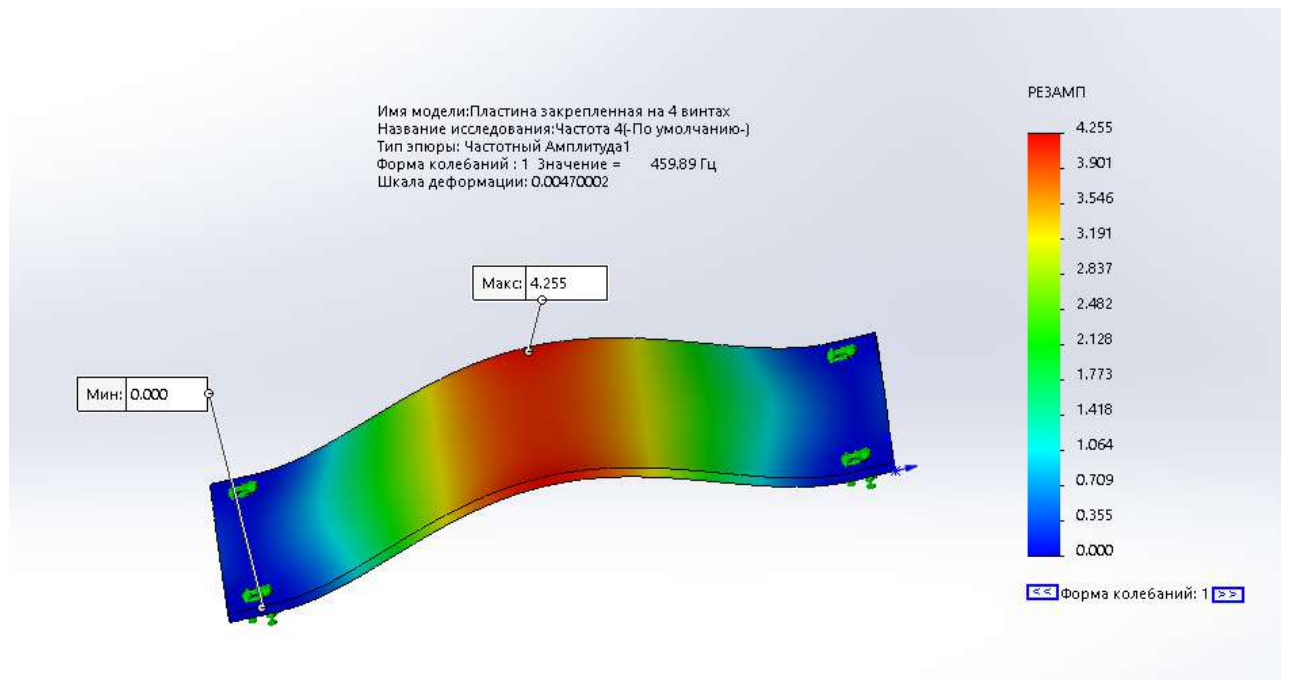


Рисунок 12 – Резонансная частота пластины 459.89 Гц.

При данном типе колебаний можно наблюдать, что максимальная амплитуда наблюдается по центру пластины и равна 4.255 мм.

### Частота 2 – 776.76 Гц.

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 13.

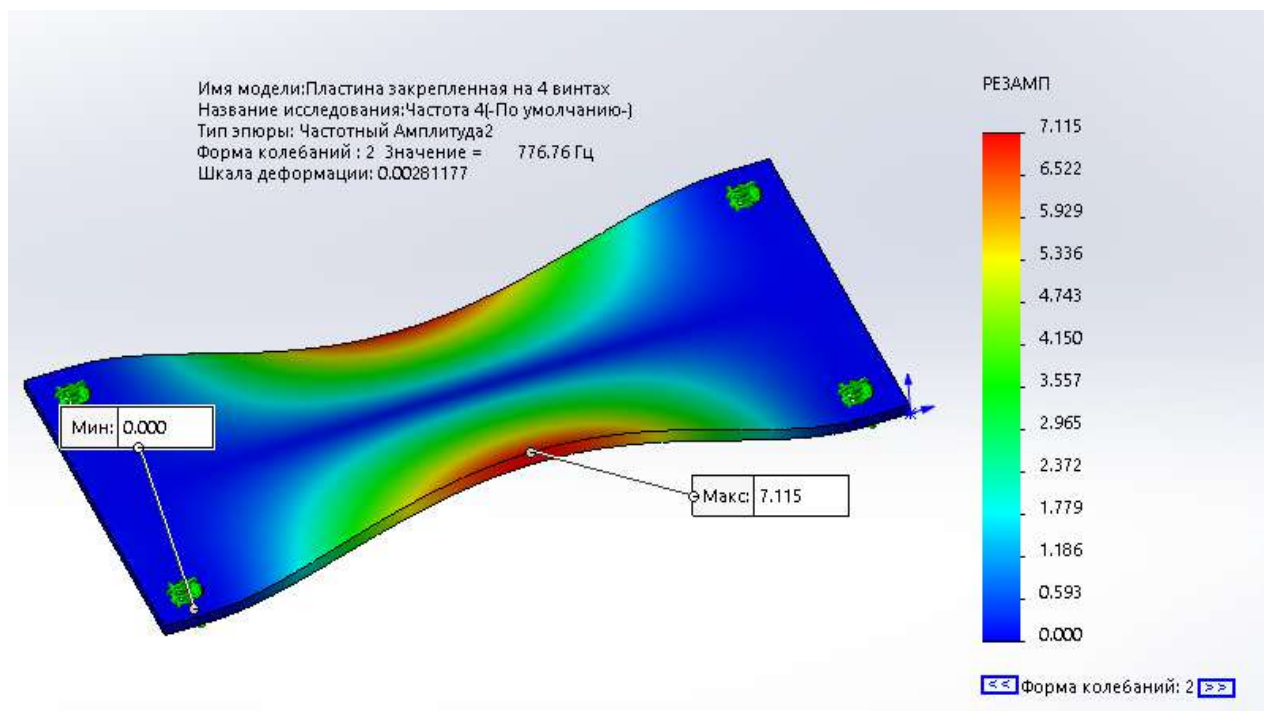


Рисунок 13 – Резонансная частота пластины 776.76 Гц

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

При данном типе колебаний можно наблюдать максимальную амплитуду на краях пластины. Амплитуда при этом равна 7.115 мм.

### Частота 3 – 1265.3 Гц.

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 14.

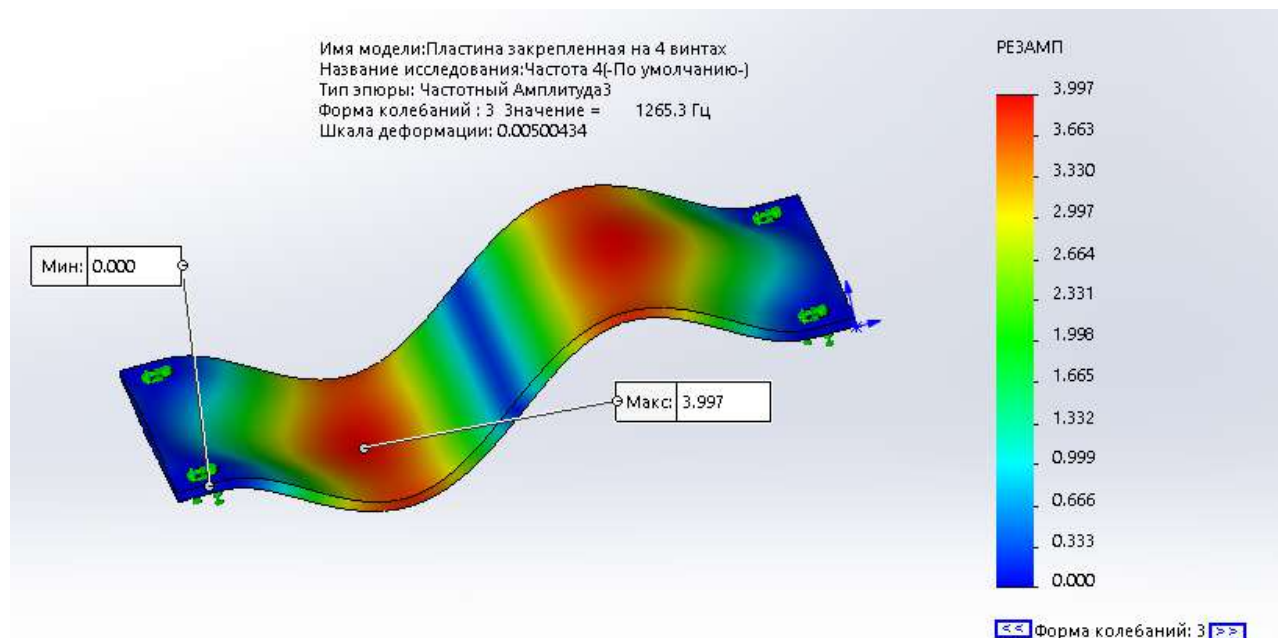


Рисунок 14 — Резонансная частота пластины 1265.3 Гц.

При данном типе колебаний наблюдается две гармоники. Максимальная амплитуда при этом будет равна 3.997 мм.

### Частота 4 – 1813.8 Гц.

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 15.

При полученном типе колебаний наблюдается также две гармоники. Максимальная амплитуда при этом будет равна 6.826 мм.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

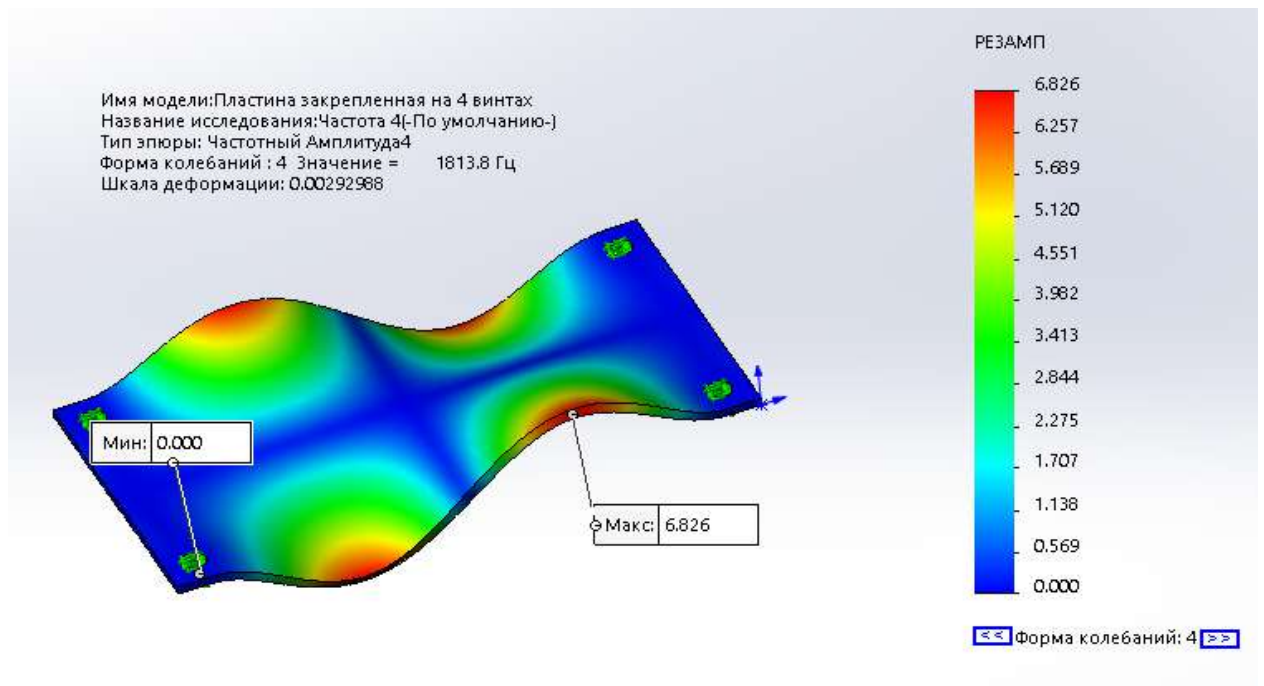


Рисунок 15 – Резонансная частота пластины 1813.8 Гц

### Частота 5 – 1923.5 Гц

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 16.

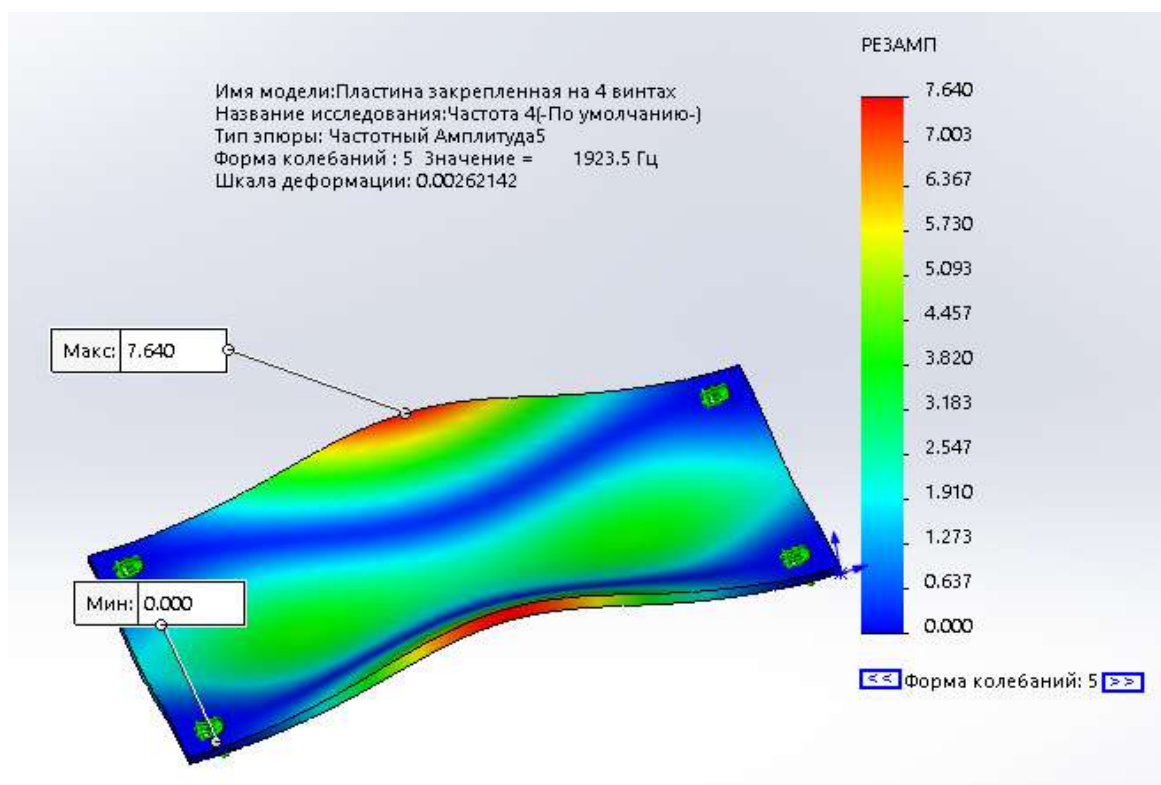


Рисунок 16 – Резонансная частота пластины 1923.5 Гц

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

По результатам моделирования можно сделать вывод, что жесткости пластины недостаточно для использования её в корпусных изделиях.

Проведём эксперимент с материалом пластины с большим значением модуля упругости. Возьмём материал «простая углеродистая сталь» и проведём аналогичный предыдущему эксперимент.

Запустим частотный анализ. В результате исследования были получены пять резонансных частот:

**Частота 1 – 467.34 Гц.**

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 17.

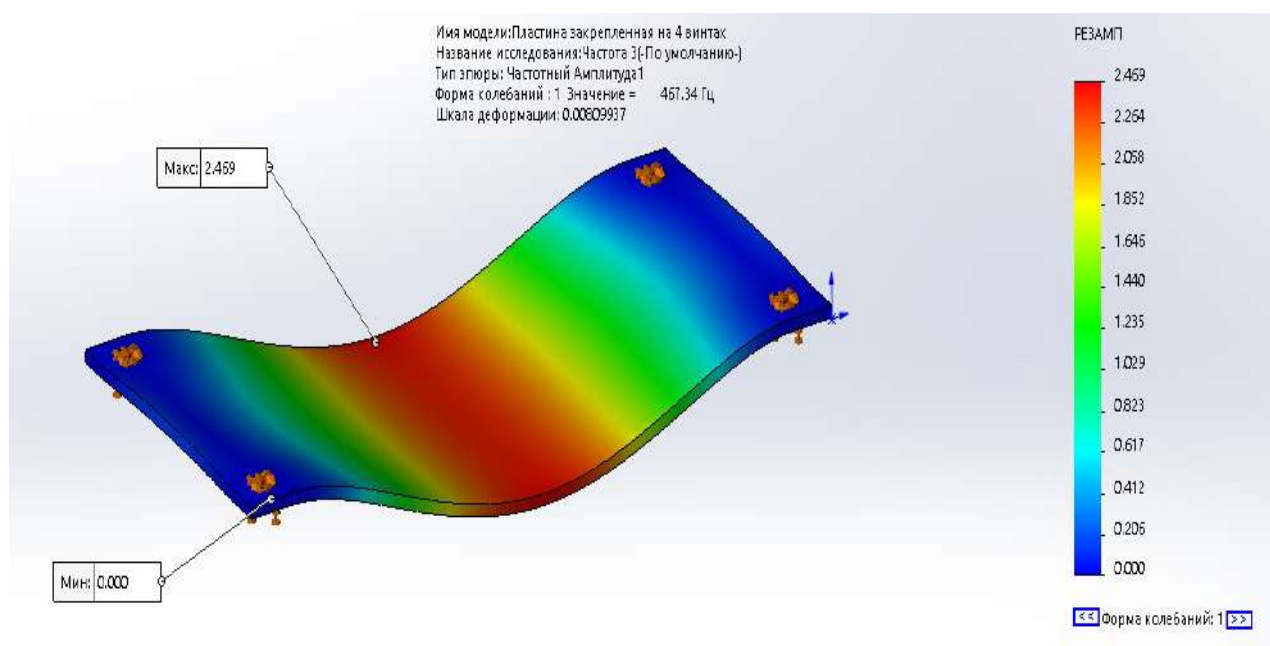


Рисунок 17 – Резонансная частота пластины 467.34 Гц

Из исследования видно, что максимальный прогиб пластины при данном виде колебаний равен 2.469 мм

**Частота 2 – 800.33 Гц.**

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 18.



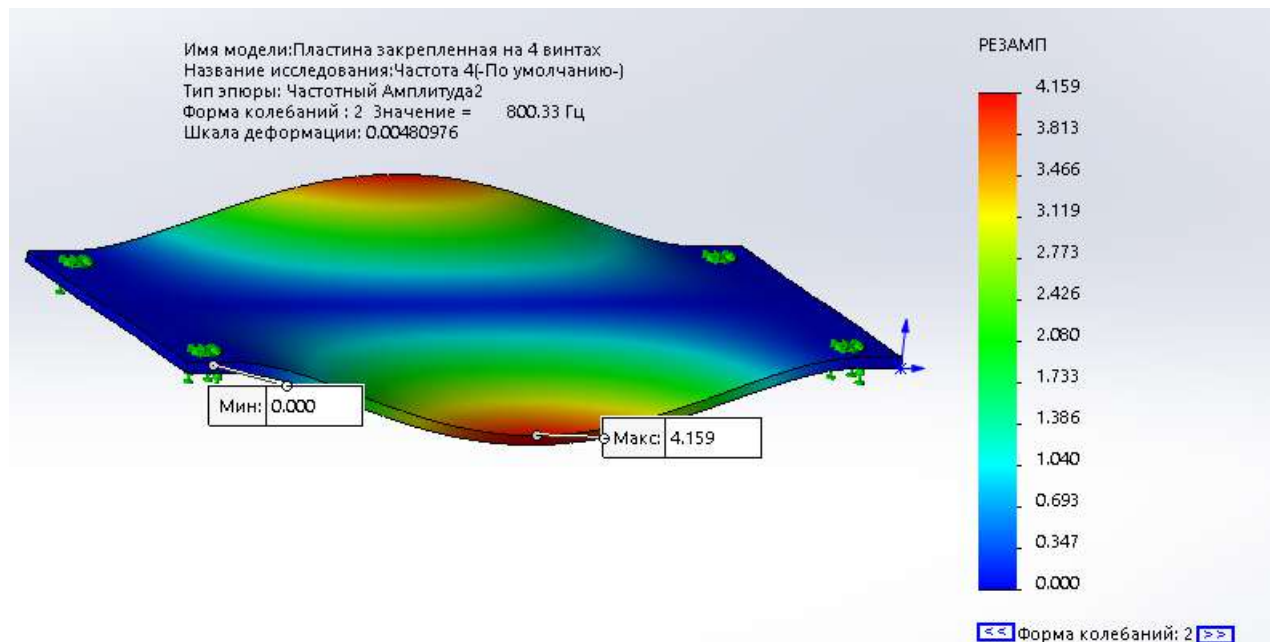


Рисунок 18 – Резонансная частота пластины 800.33 Гц.

При таком виде колебаний максимальное значение прогиба значительно выше, чем при первой частоте и равно 4.159 мм.

### Частота 3 – 1280.6 Гц.

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 19.

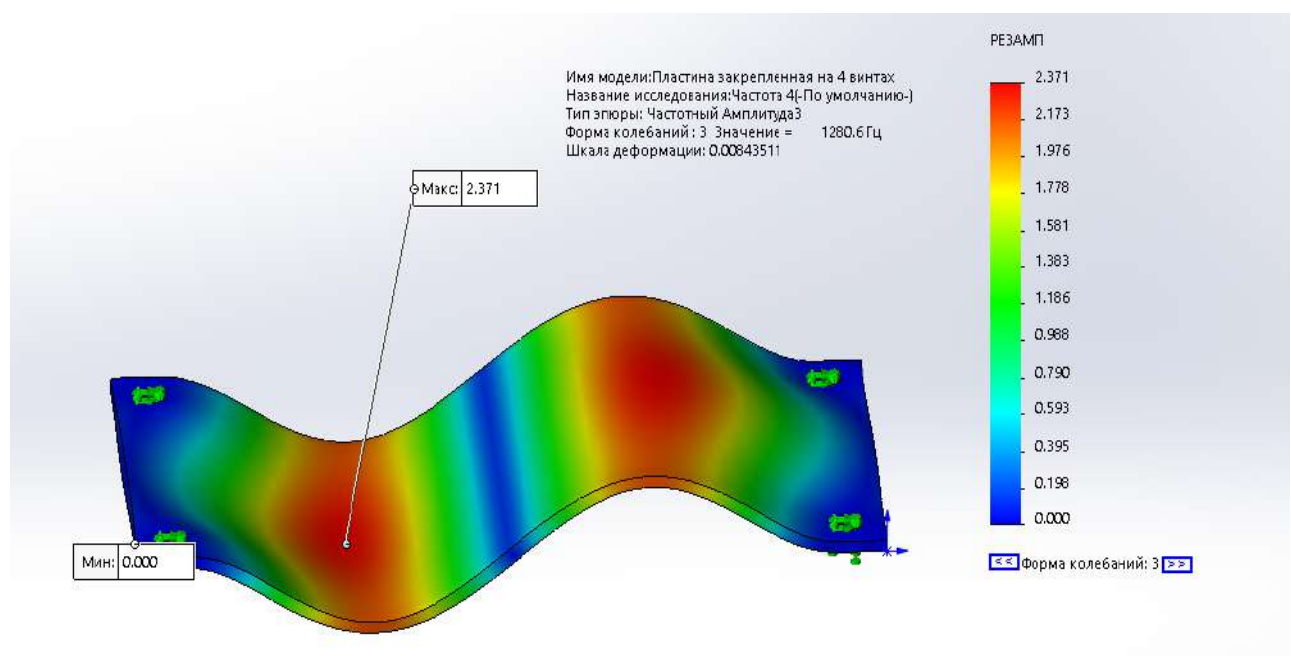


Рисунок 19 – Резонансная частота пластины 1280.6 Гц

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

При таком типе колебаний максимальный прогиб равен 2.371 мм, что меньше, чем амплитуда колебаний на частоте 1.

### Частота 4 – 1858 Гц.

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 20.

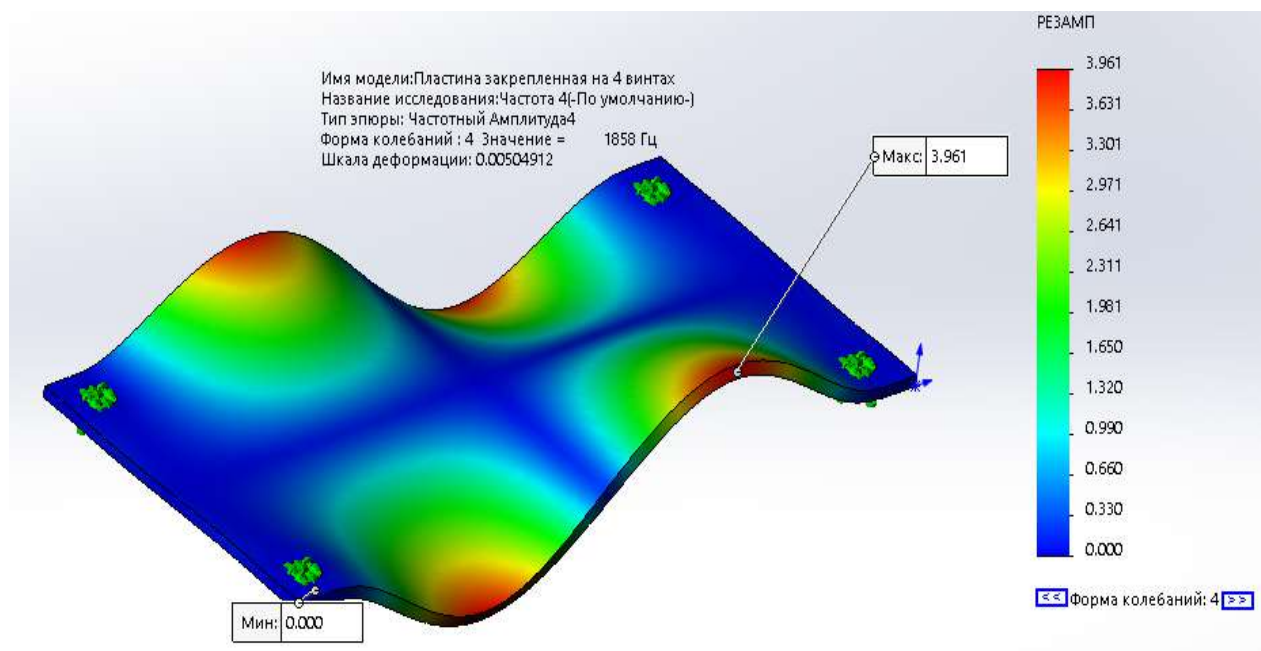


Рисунок 20 – Резонансная частота пластины 1858 Гц.

При данном типе колебаний максимальные точки амплитуды колебаний наблюдаются диагонально и равны 3.961 мм.

### Частота 5 – 1952.9 Гц.

Результат моделирования можно увидеть на рисунке 21.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что жесткости пластины недостаточно для использования в корпусах, так как амплитуда колебаний слишком большая.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



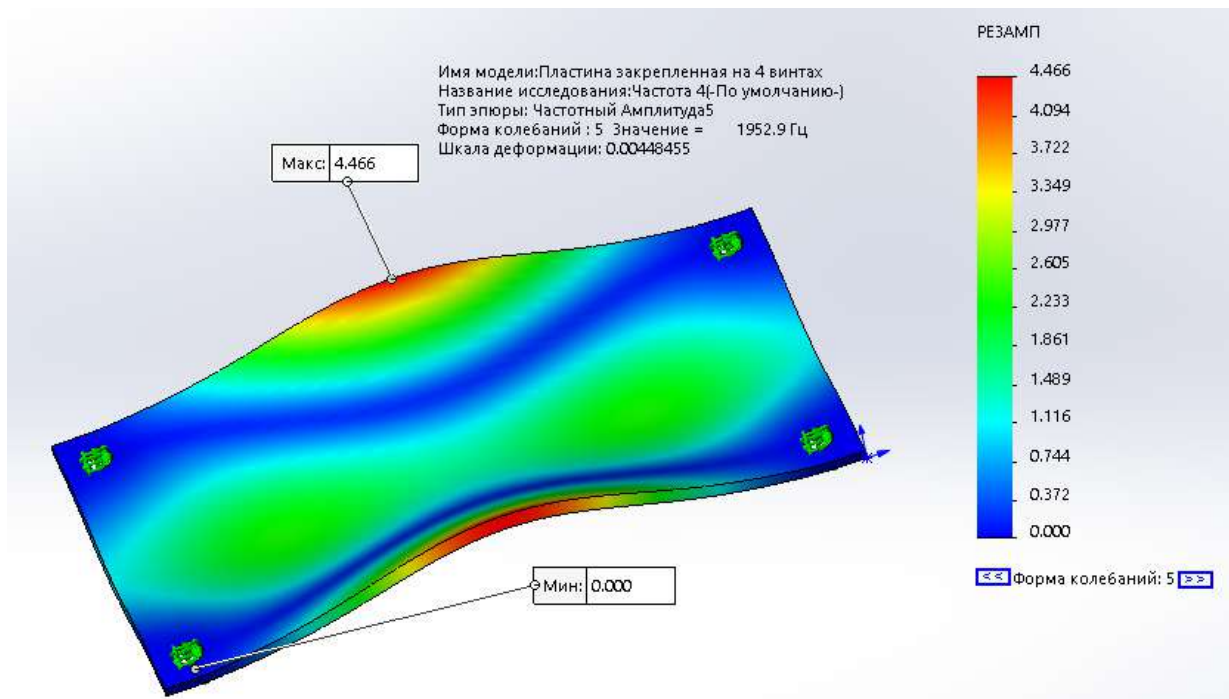


Рисунок 21 – Резонансная частота пластины 1952.9 Гц.

*Выводы по проведённым анализам:* после проведённых исследований, можно сделать вывод о том, что значение модуля упругости значительно влияет на амплитуду колебаний. Пластина из материала «сплав алюминия 1060» имела максимальную амплитуду, равную 7.64 мм. Пластина из материала «простая углеродистая сталь» имела максимальную амплитуду, равную 4.466 мм. При этом модуль упругости алюминия равен  $6.6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а модуль упругости стали равен  $2.1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>.

Добавим ребра жесткости, посредством которых попробуем уменьшить имеющиеся виды колебаний и проведём аналогичное исследование с материалом «простая углеродистая сталь».

После добавления ребер жесткости пластина будет иметь вид, представленный на рисунке 22.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

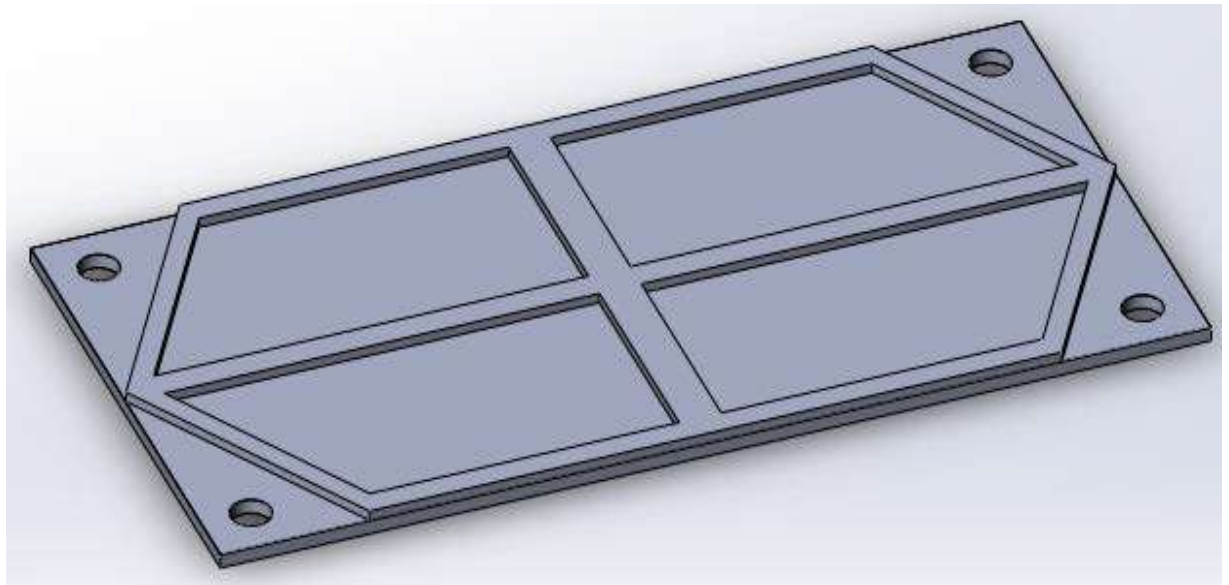


Рисунок 22 – Пластина с ребрами жесткости

В результате исследования было выявлено пять собственных частот пластин:

- 524.79 Гц (Рисунок 23)
- 878.97 Гц (Рисунок 24)
- 1634.2 Гц (Рисунок 25)
- 2154.5 Гц (Рисунок 26)
- 2652.3 Гц (Рисунок 27)

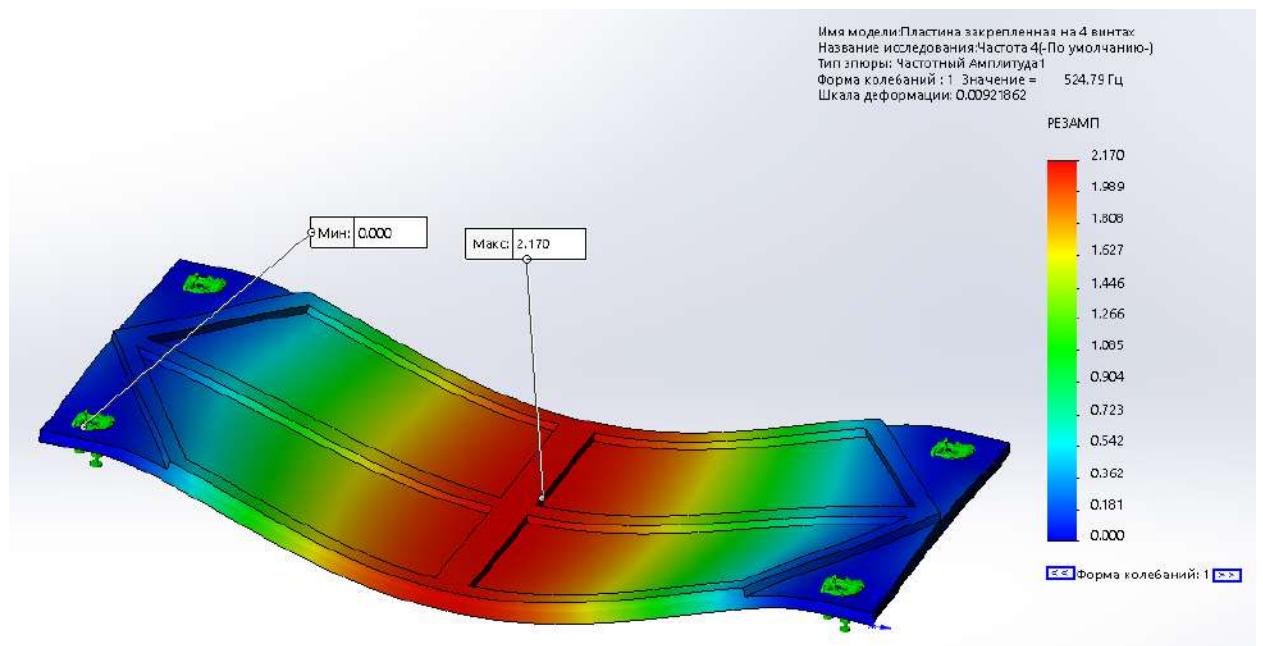


Рисунок 23 – Амплитуда пластины при частоте 605.88 Гц

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

По сравнению с пластиной, исследуемой в эксперименте с одним ребром жёсткости амплитуда колебаний снизилась на 0.3 мм. Зато повысилась резонансная частота. В первом эксперименте частота была 507 Гц, у пластины с ребрами жесткости резонансная частота равна 524 Гц.

Рассмотрим второй вид колебаний.

В сравнении с предыдущим экспериментом резонансная частота увеличилась. У пластины с несколькими ребрами жесткости резонансная частота больше на 78 Гц. Также амплитуда уменьшилась на 0.5 мм.

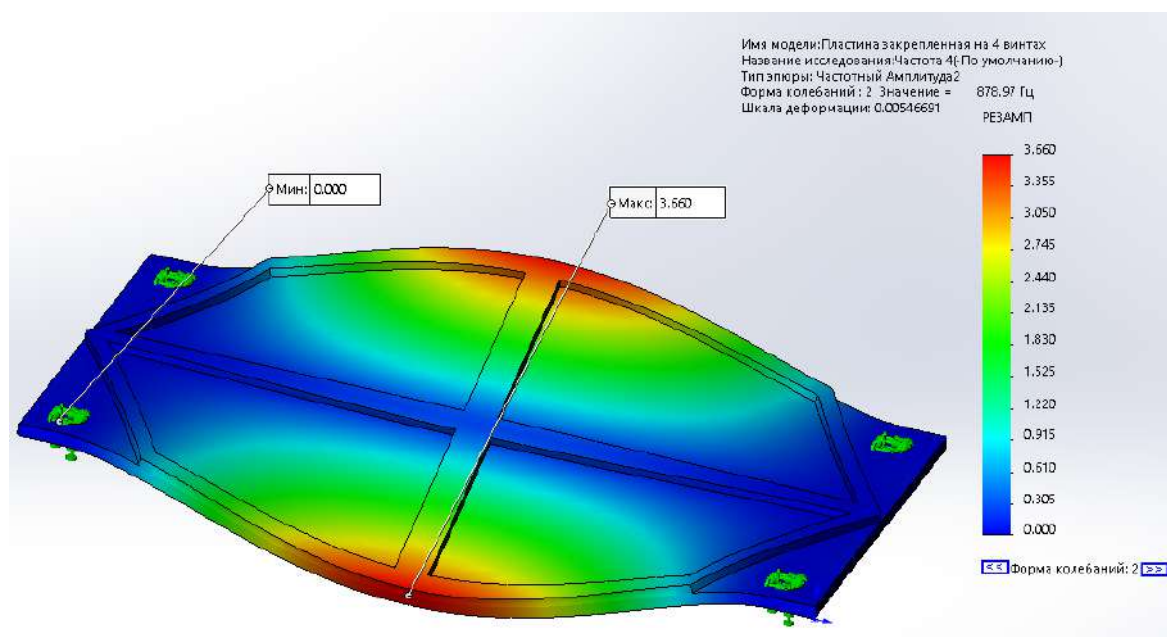


Рисунок 24 – Амплитуда колебаний пластины при частоте 878.97 Гц

Третий вид колебаний. По результатам эксперимента можно заметить, что резонансная частота увеличилась на 209 Гц, а амплитуда уменьшилась на 0.36 мм. Деформация на краях пластины заметно уменьшилась, максимальный прогиб наблюдается на центральном ребре жёсткости.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

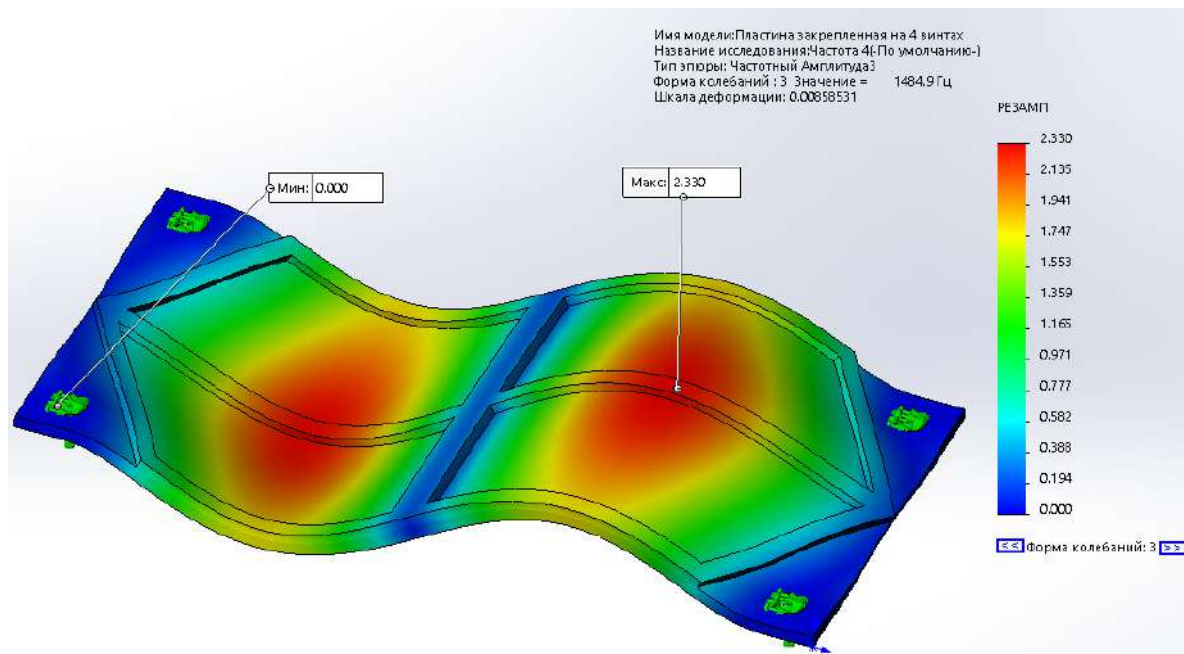


Рисунок 25 – Амплитуда колебаний пластины при частоте 1489.9 Гц

Рассмотрим следующий вид колебаний.

Резонансная частота при данном типе колебаний увеличилась от 1992.8 Гц до 2112. Амплитуда же уменьшилась на 0.45 мм.

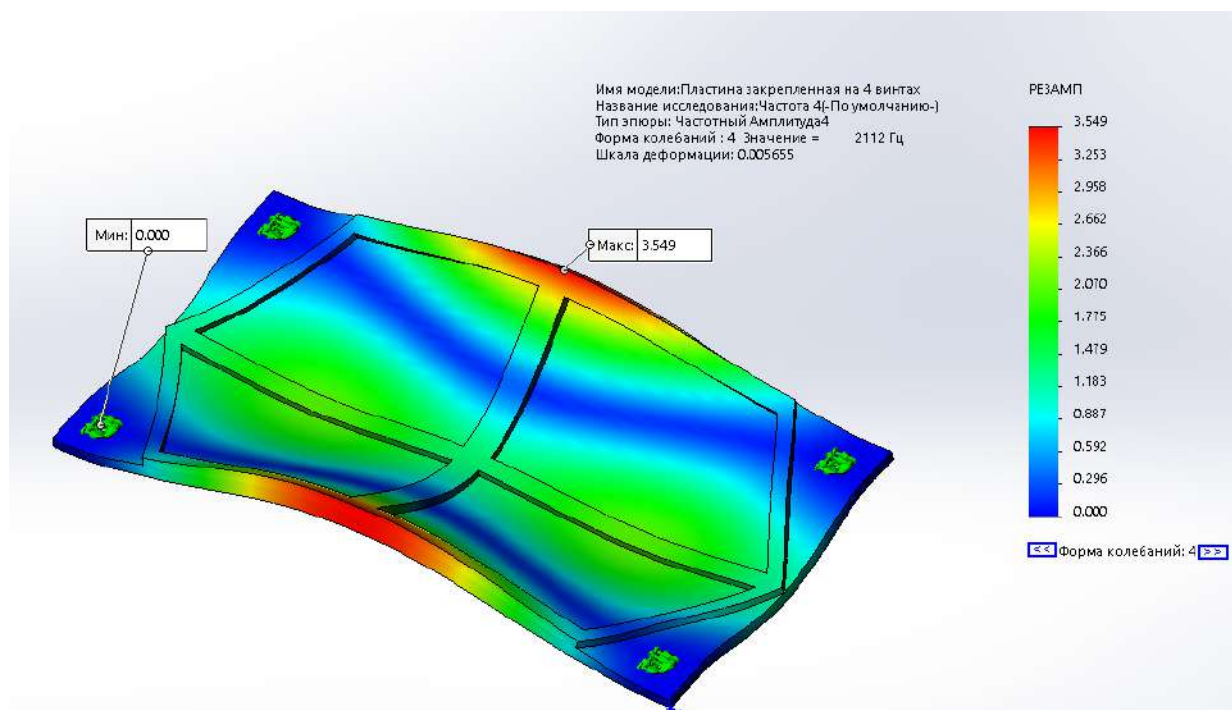


Рисунок 26 – Амплитуда колебаний пластины при частоте 2112 Гц

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



## Пятый вид колебаний:

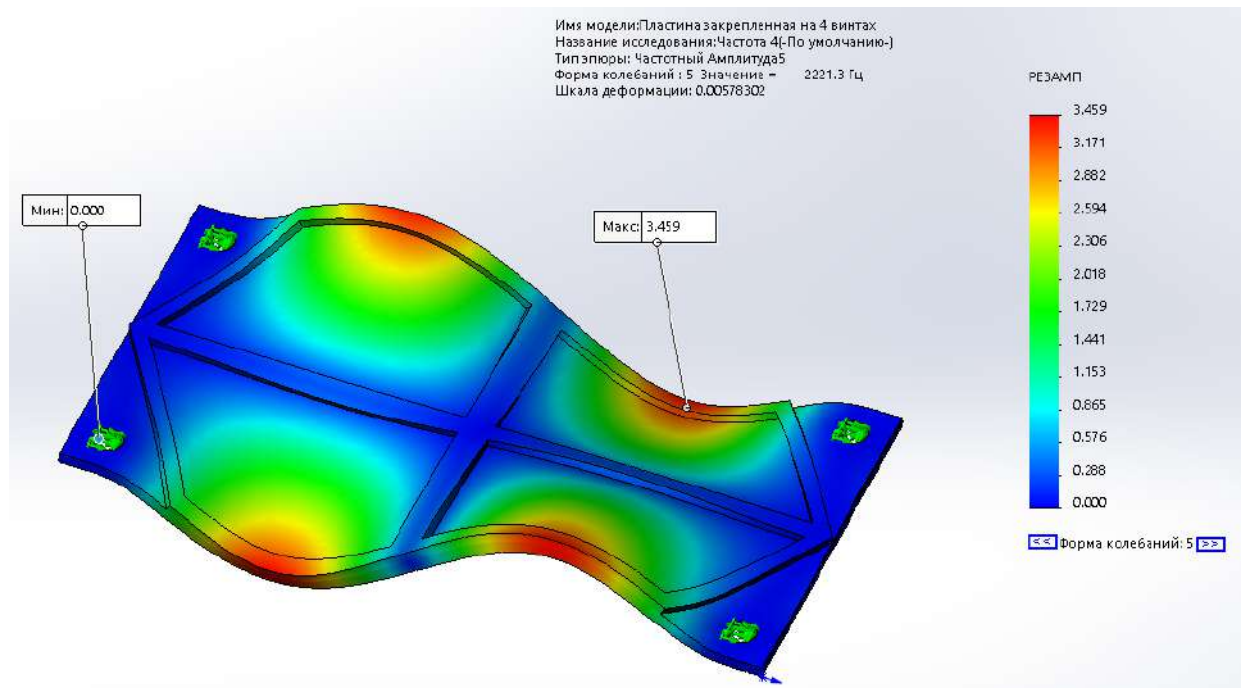


Рисунок 27 – Амплитуда колебаний пластины при частоте 2221.3 Гц

*Выводы по исследованию:* при данном расположении ребер жесткости повысилось значение резонансной частоты для всех типов колебаний. Также уменьшилась амплитуда колебаний.

*Выводы по всем экспериментам:* из проведённых экспериментов мы убедились, что обычных пластин без каких-либо способов повышения их жёсткости недостаточно для использования в корпусных деталях. В ходе исследований было заметно, как оребрение влияет на амплитуду колебаний объекта. Амплитуда колебаний при одной гармонике вдоль центра пластины без ребра равна 2.5мм, а амплитуда пластины с теми же габаритами, но с ребрами жесткости равна 1.68мм. По всем проделанным исследованиям заметно влияние различных ребер жёсткости на частотные и амплитудные характеристики объектов.

Рассмотрим несколько примеров реальных корпусных деталей:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

Для исследования на жесткостные свойства была взята деталь, используемая в корпусе для персонального компьютера. Построим данную деталь в САD-системе и исследуем её (Рисунок 28).

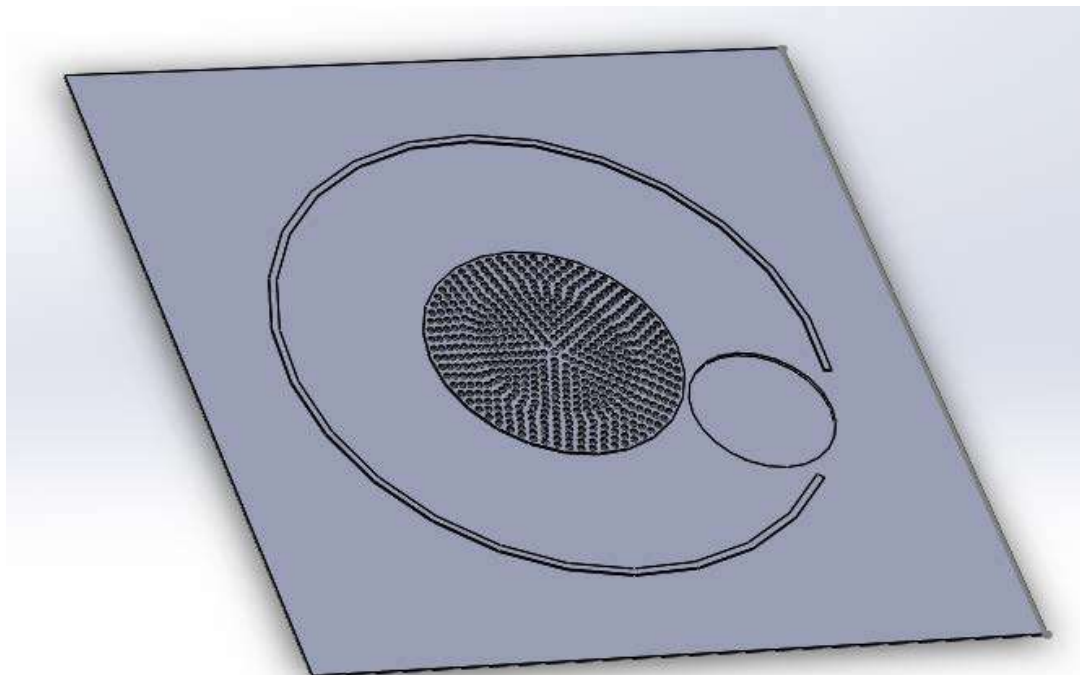


Рисунок 28 – Деталь корпуса персонального компьютера

Запустим статическое исследование объекта, с силой приложенной к центру и равной 15 Н. Результат моделирования можно увидеть на рисунке 29.

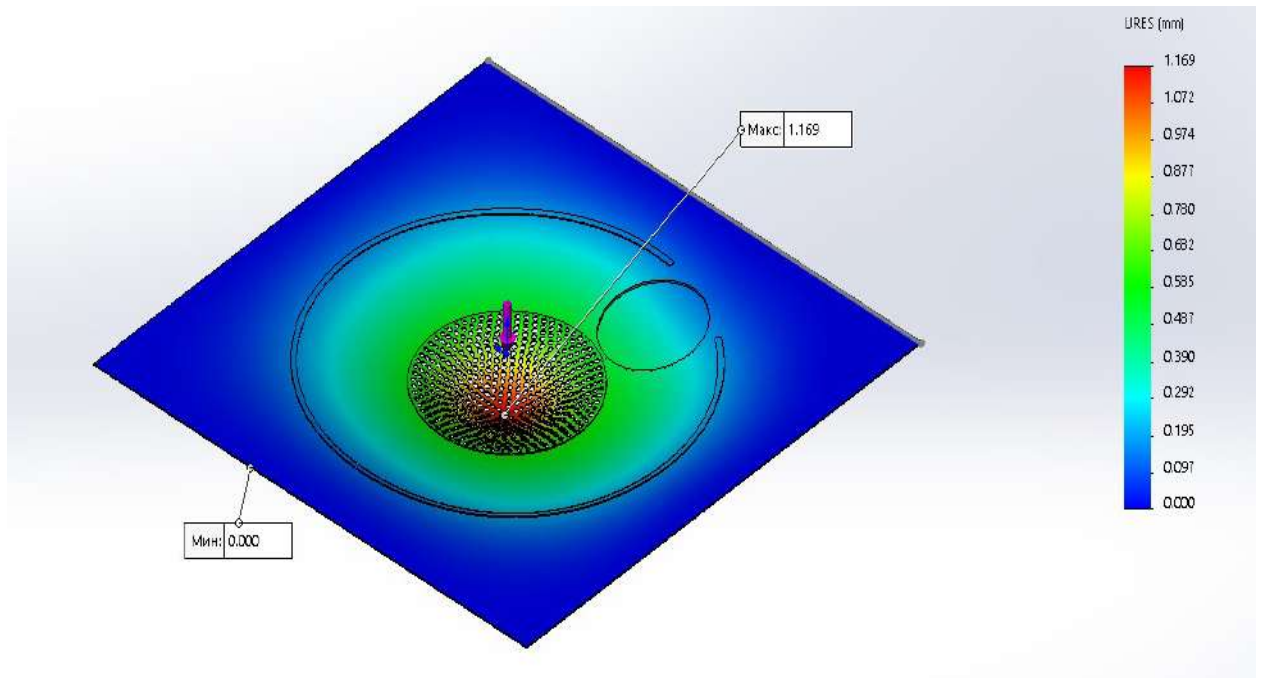


Рисунок 29 – Статическое исследование детали

По результатам эксперимента максимальный прогиб детали получился 1.169 мм. Можно заметить, что изгиб начинает возрастать после ребра жесткости в форме дуги.

Для исследования влияния окружности с множеством отверстий проведём эксперимент с той же силой, но убрав отверстия из детали (Рисунок 30).

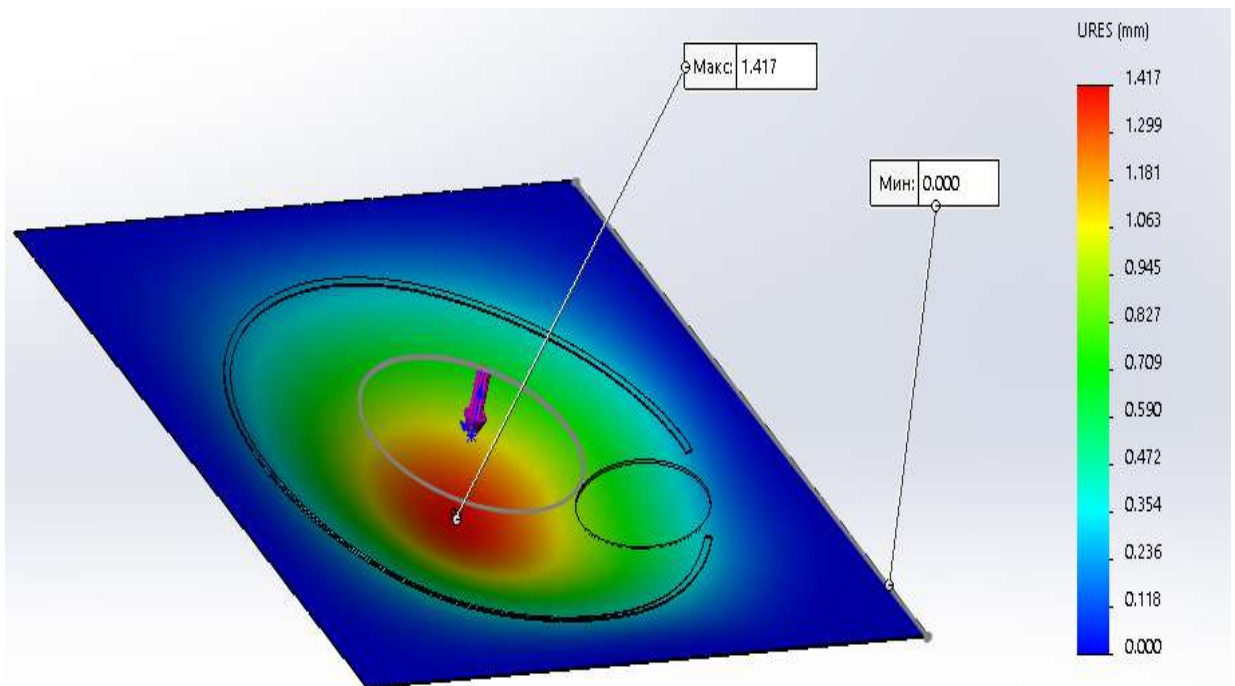


Рисунок 30 – Корпусная деталь без отверстий

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

По результатам эксперимента можно увидеть, что деформация корпуса увеличилась. Для объяснения полученных результатов сравним напряжения в детали с отверстиями (Рисунок 32) и без них (Рисунок 31).

По эпюрам напряжений можно сделать вывод, что при отсутствии отверстий напряжение распределяются равномерно по всей плоскости детали, в результате чего деформация увеличивается. Максимальное напряжение возникает в выдавленной на детали окружности. При наличии отверстий, основные напряжения возникают в сетке. В результате чего деформируется именно она.

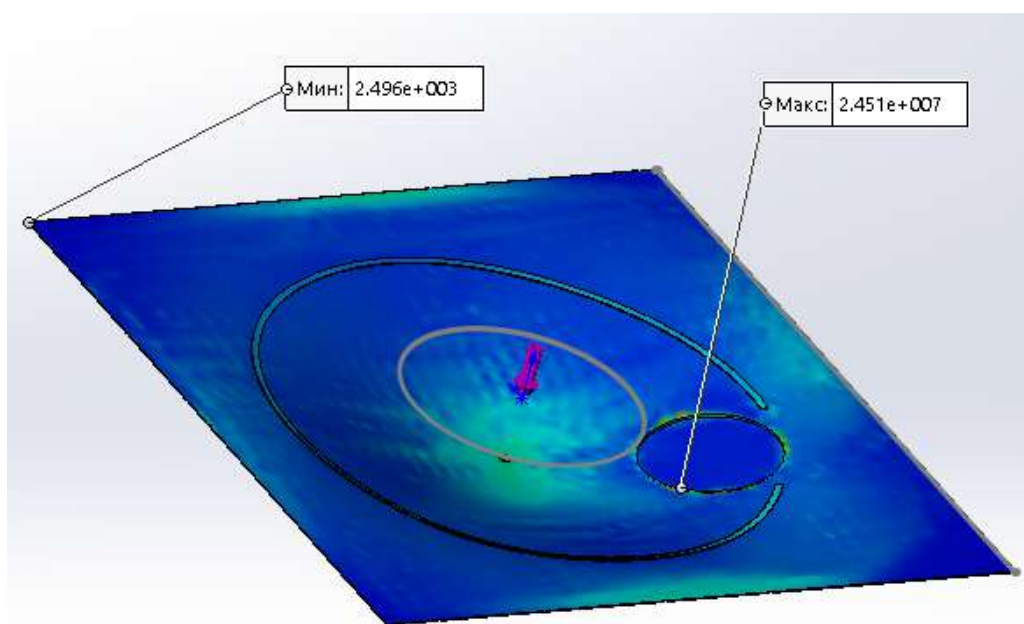


Рисунок 31 – Эпюра напряжений в детали без отверстий

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



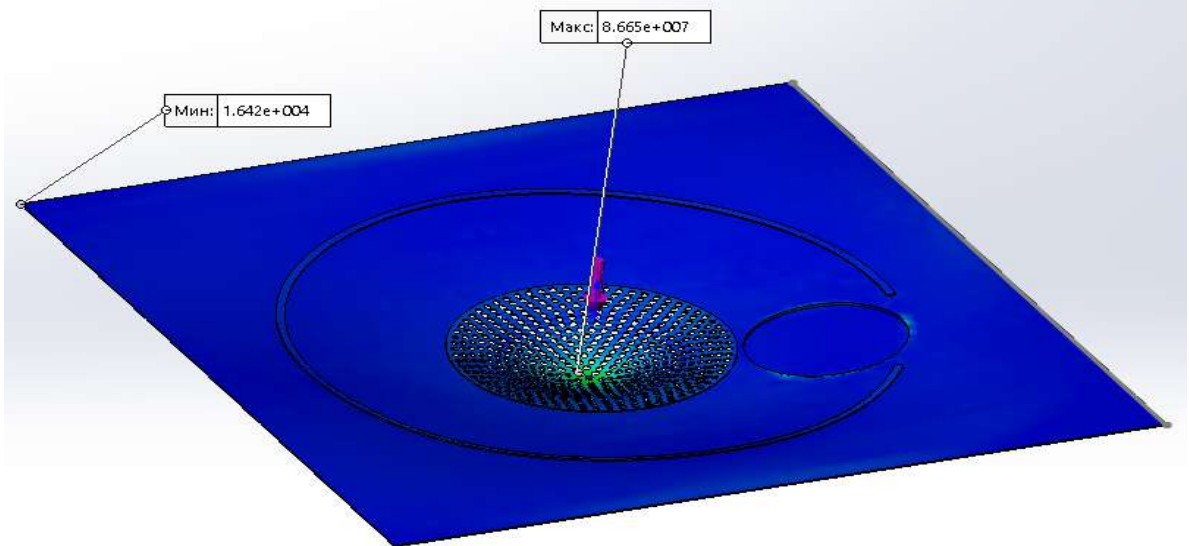


Рисунок 32 – Эпюра напряжений детали с отверстиями

Выделим несколько точек на корпусной детали с помощью инструмента «Зондирование», после чего измерим прогибы в данных точках на реальном объекте. Точки, выбранные для сравнения, можно увидеть на рисунке 33.

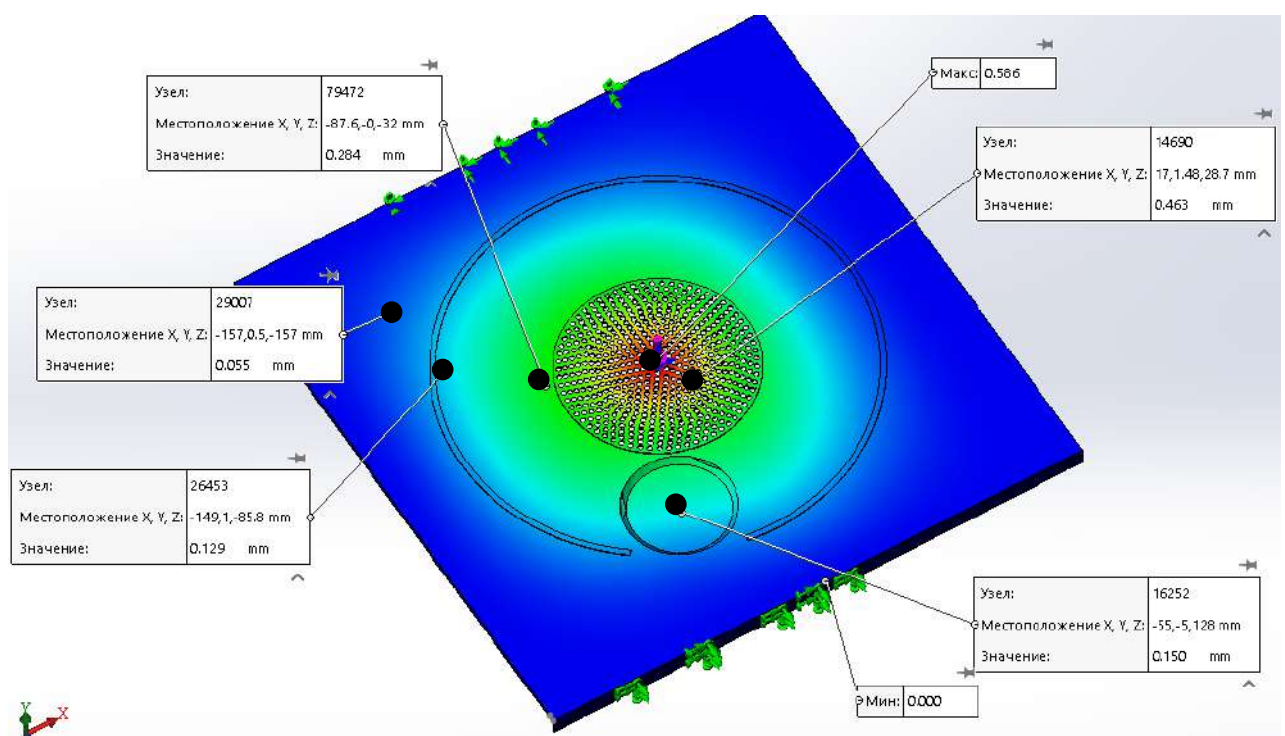


Рисунок 33 – Точки, выбранные для сравнения

Сравним модель, построенную в САД-системе, с реальным объектом. Для этого поместим микрометрическую головку в корпус и создадим нагрузку равную

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

15 ньютонам. Результаты, полученные при моделировании и эксперименте, можно увидеть в таблице 2:

Таблица 2 — Результаты измерений

Результаты измерений		
Точка	Прогиб, рассчитанный при моделировании	Реальное значение прогиба
1	0.586	0.55
2	0.463	0.47
3	0.284	0.32
4	0.150	0.17
5	0.130	0.15
6	0.055	0.07

Сравним показания смоделированного объекта и реального.

Абсолютная погрешность [12]:

$$\Delta_x = X_{\text{изм}} - X_{\text{ист}}$$

где  $X_{\text{изм}}$  – измеренное значение;

$X_{\text{ист}}$  – истинное значение.

Абсолютная погрешность для каждой точки:

$$\Delta_{x1} = 0.066$$

$$\Delta_{x2} = 0.007$$

$$\Delta_{x3} = 0.036$$

$$\Delta_{x4} = 0.02$$

$$\Delta_{x5} = 0.131$$

$$\Delta_{x6} = 0.035$$

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta_x}{X_{\text{ист}}} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon_{x1}=6.1\%$$

$$\varepsilon_{x2}=1.5\%$$

$$\varepsilon_{x3}=11.3\%$$

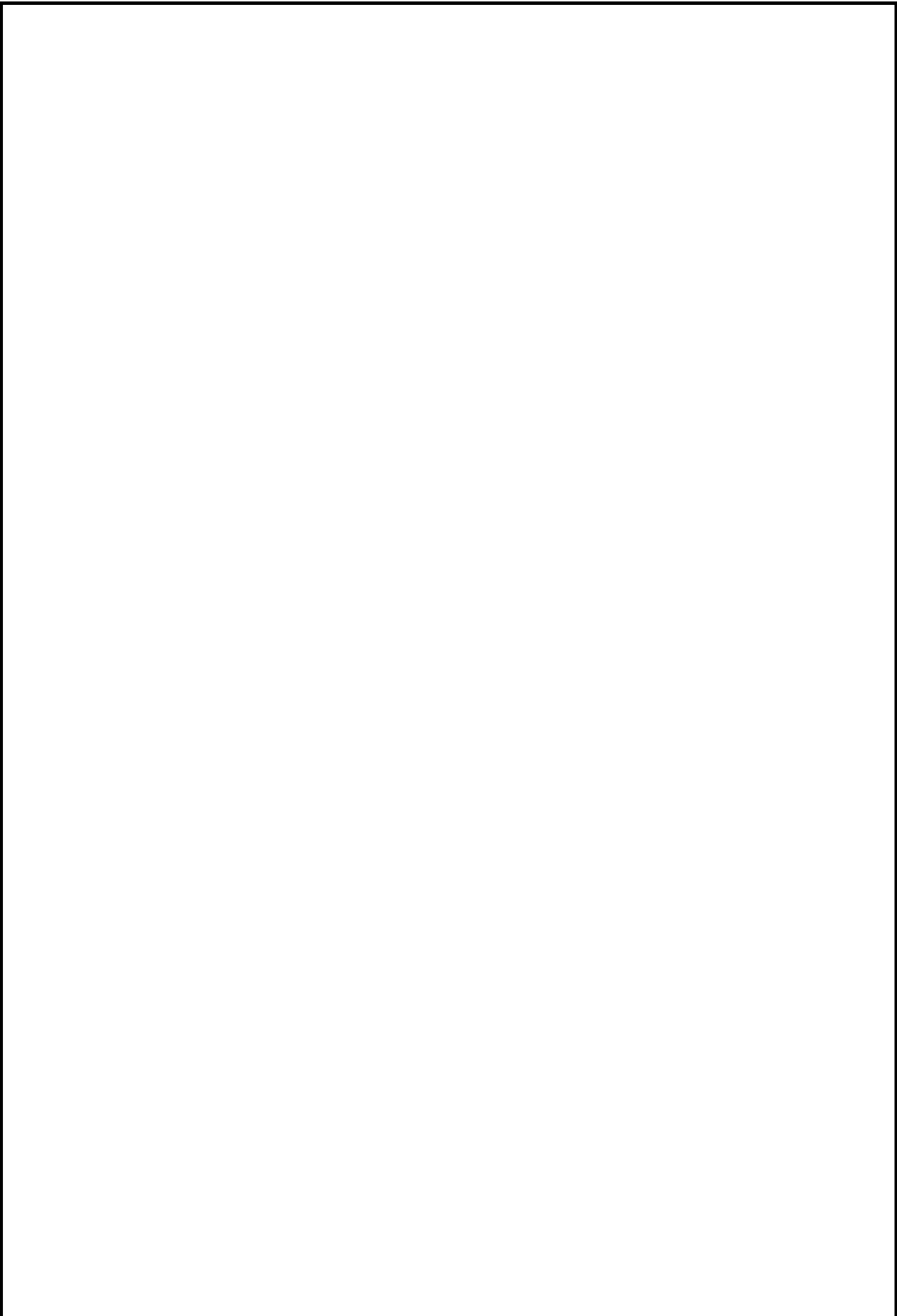
$$\varepsilon_{x4}=13.3\%$$

$$\varepsilon_{x5}=15.3\%$$

$$\varepsilon_{x6}=18\%$$

Вывод: средняя погрешность по всей модели равна 10.9%. Это можно объяснить такими свойствами металла, как старение, износ.

**Вывод по разделу два:** в данном разделе были рассчитаны прогибы таких элементов корпусов, как балки и пластины. Для балок были построены графики зависимости прогиба от силы нажатия, также были построены графики, по которым можно увидеть прогиб балки на определённом расстоянии от её края. Так же был проведён анализ пластин в программной среде SolidWorks Simulation. В ходе анализа наблюдались различные типы колебаний пластин на их резонансных частотах, оценивалось влияние ребер жёсткости на резонансные частоты и деформацию пластин. Ребра жесткости, расположенные вдоль длины, заметно снижают колебания пластины по длине. Был исследован корпусной элемент персонального компьютера, проведён её статический анализ. По результатам эксперимента оценено влияние отверстий для вентиляции и ребер, которые делаются путём гибки металла на жесткость пластины. Была оценена погрешность модели в целом.



					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 372. ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		39

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ СТЕНДА

#### 3.1. Формирование нижней корпусной детали

Нижняя корпусная деталь выполнена в форме прямоугольника с необходимыми для крепления элементов и соединения корпусных деталей приливами. Внешний вид детали можно увидеть на рисунке 34.

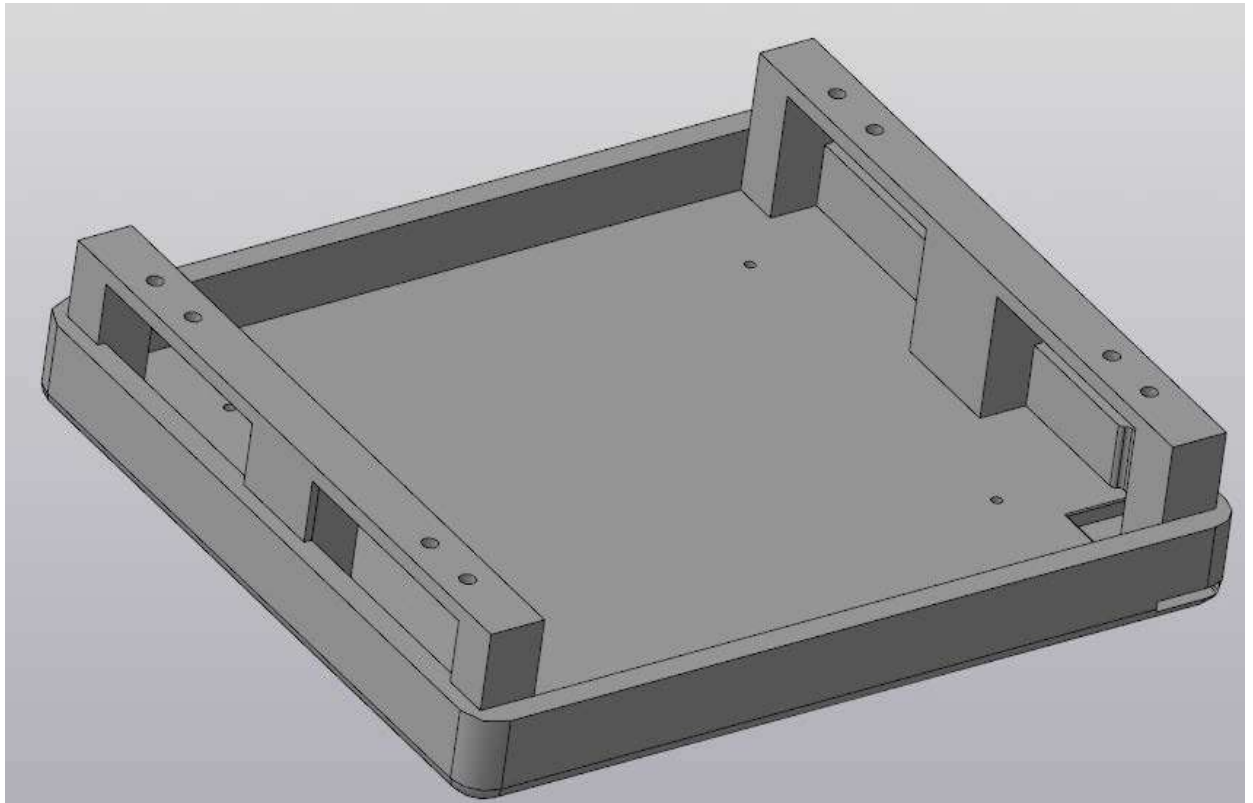


Рисунок 34 — Нижняя корпусная деталь

В нижней части данной детали присутствуют отверстия для крепления к ней рельсовых направляющих. Также имеется одно отверстие для крепления шкива ременной передачи. Паз в правом нижнем углу предназначен для крепления двигателя Nema 17 Stepper Motor length 21mm.

Также присутствуют стойки, на которые кладётся исследуемый объект. Все отверстия для крепления двигателя выполнены для винтов по ГОСТ Р ИСО 4762-2012 [12]. Отверстия для скрепления корпусных деталей выполнены по ГОСТ Р ИСО 10642-2012 [13].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

### 3.2. Формирование опоры для исследуемого объекта

Опору, прикрепленную к детали, можно увидеть на рисунке 35.

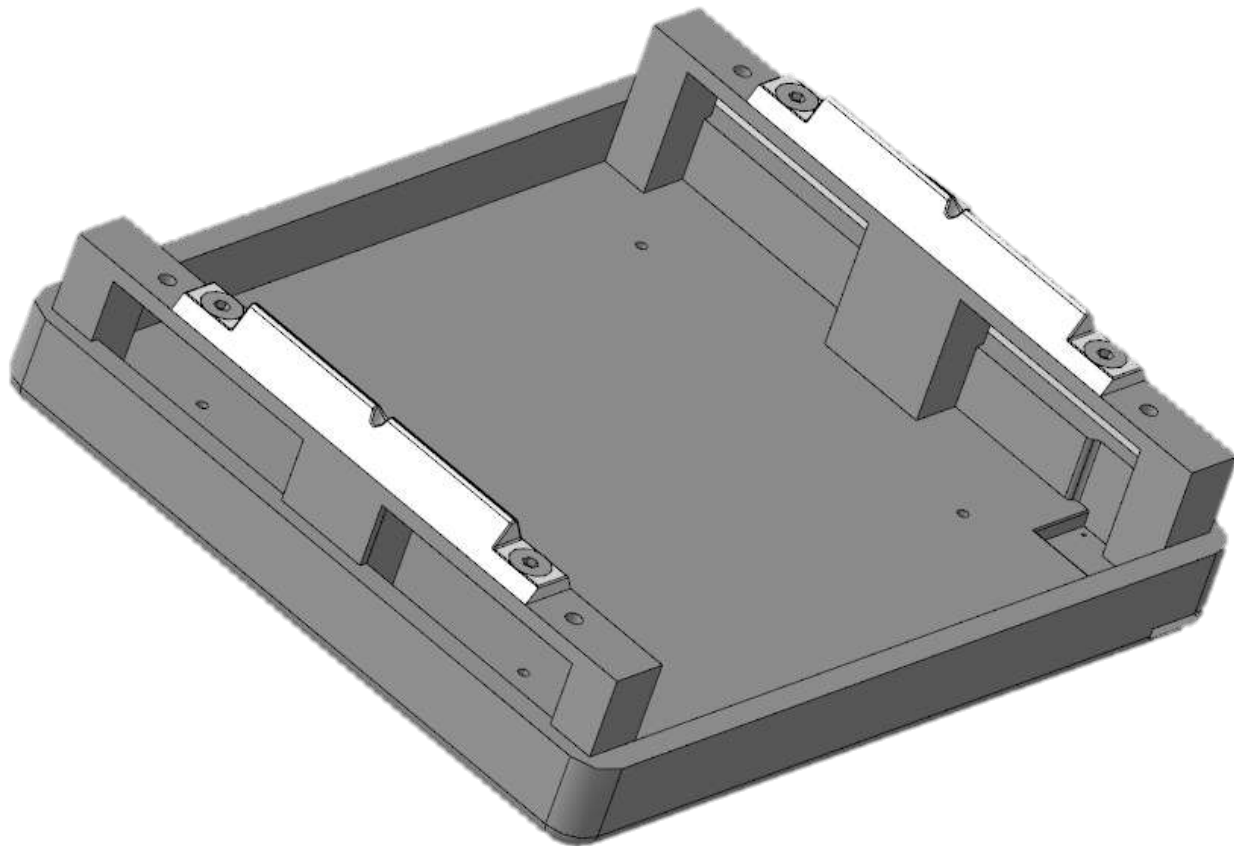


Рисунок 35 – Опора для объекта

В центре опоры присутствует отверстие М10, с помощью которого имитируется шарнирно-неподвижная опора путём закрепления объекта винтом к данному отверстию.

### 3.3. Формирование механизма перемещения датчика Capandt 6019

Для реализации перемещения используются направляющие, представленные на рисунке 36. Направляющие крепятся винтами, выполненными по ГОСТ Р ИСО 12474-2012, длиной 30 мм [14].

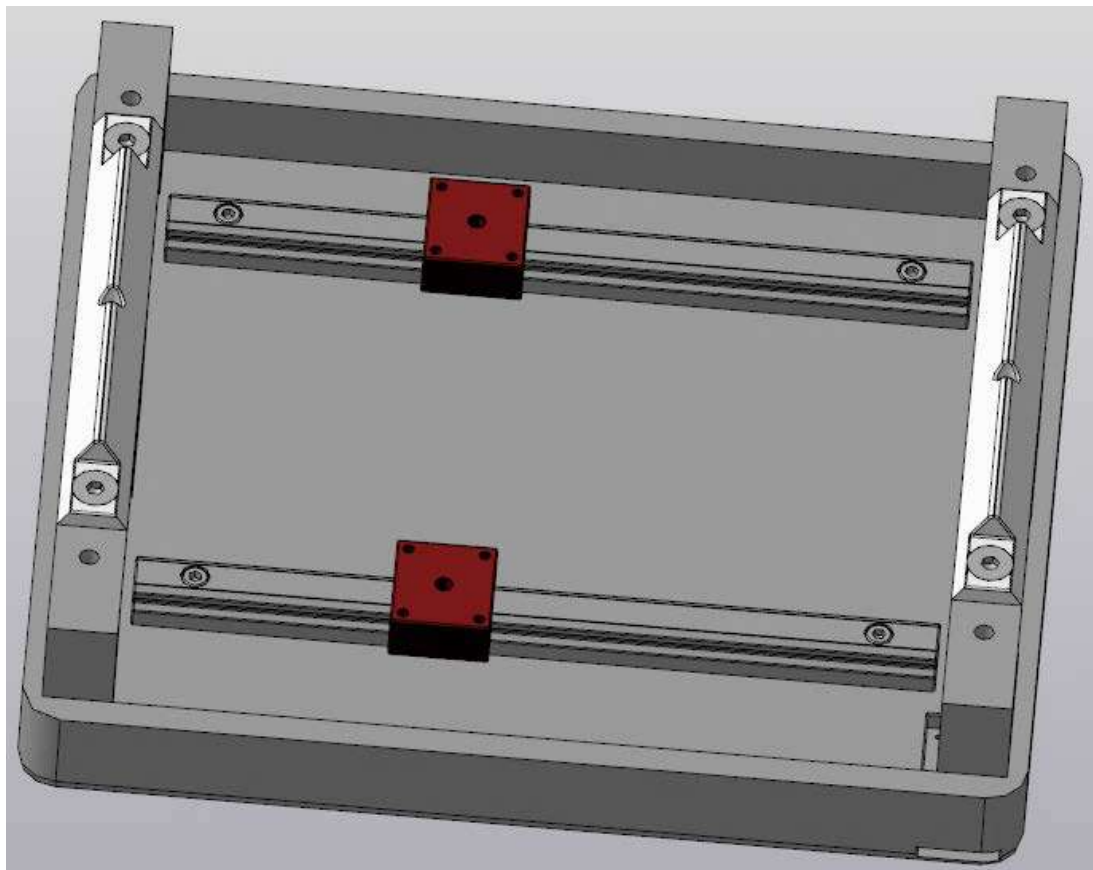


Рисунок 36 – Нижняя корпусная деталь с направляющими

В сечении направляющая и каретка к ней имеют вид, представленный на рисунке 37.

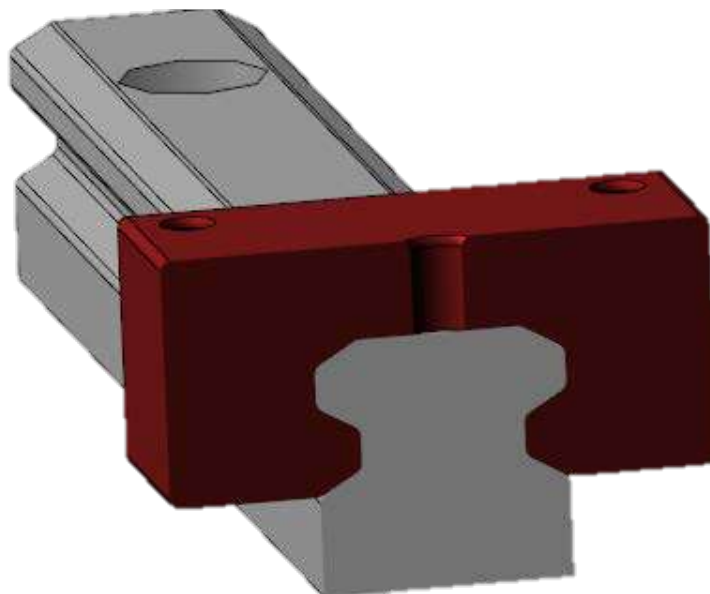


Рисунок 37 – Сечение каретки и направляющей.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

К корпусу детали крепится электродвигатель на 4 винта ГОСТ Р ИСО 4762-2012, длиной 25мм [12]. Также к электродвигателю прикреплен шкив. В дальнейшем, двигатель и шкив используются как сборочная единица (Рисунок 38).

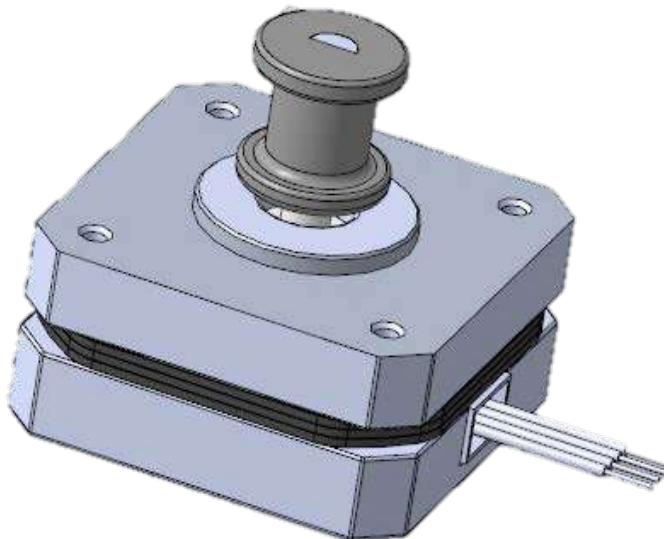


Рисунок 38 – Прикрепленный электродвигатель

Для реализации механизма перемещения разработан шкив, который изображён на рисунке 39.

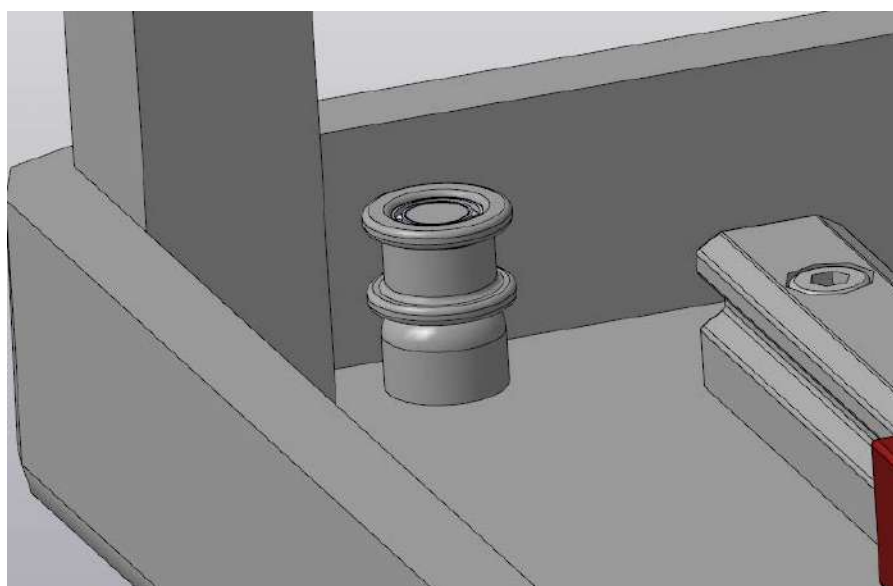


Рисунок 39 – Шкив, закрепленный на держателе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



На держатель насаживаются две опоры качения, выполненные по ГОСТ 10058-90 [15]. На внешнее кольцо опоры качения устанавливается шкив, после чего устанавливается последняя опора качения.

Перемещение реализуется с помощью ременной передачи. Так как установка цельного ремня невозможна, необходимо реализовать жесткое закрепление двух концов ремня на каретке (Рисунок 40).

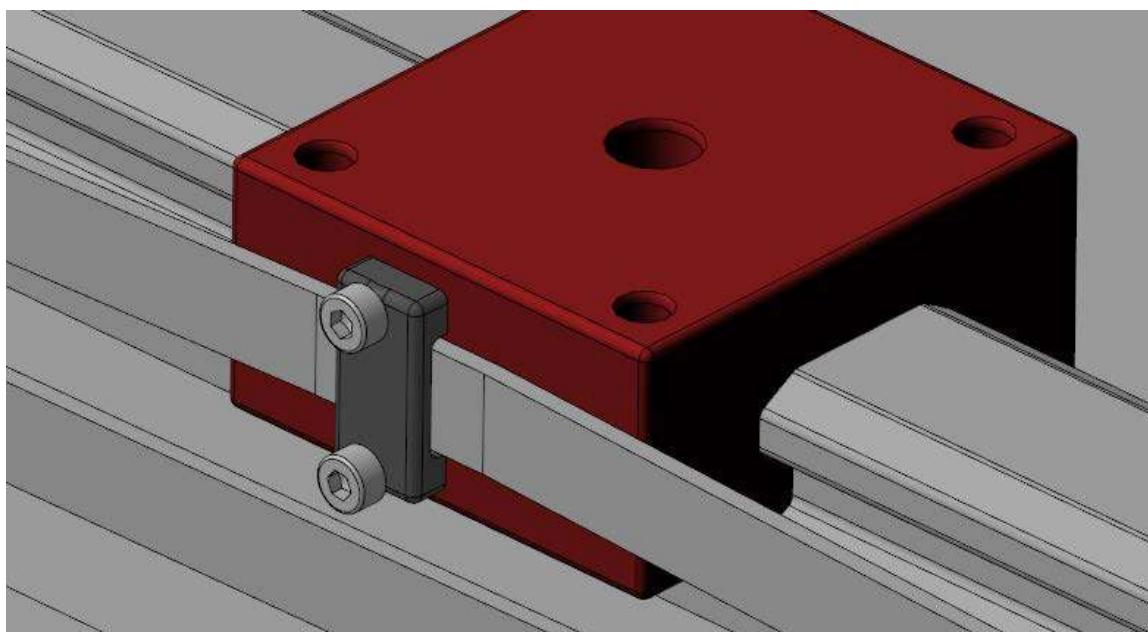


Рисунок 40 – Крепеж ремня

Для надежного скрепления зажим прижимается двумя винтами М3х5 ГОСТ 4762-2012 [12].

Ремень имеет длину 830мм и выполнен по ГОСТ 23831-79 [16]. Общий вид механизма перемещения вдоль оси представлен на рисунке 41.

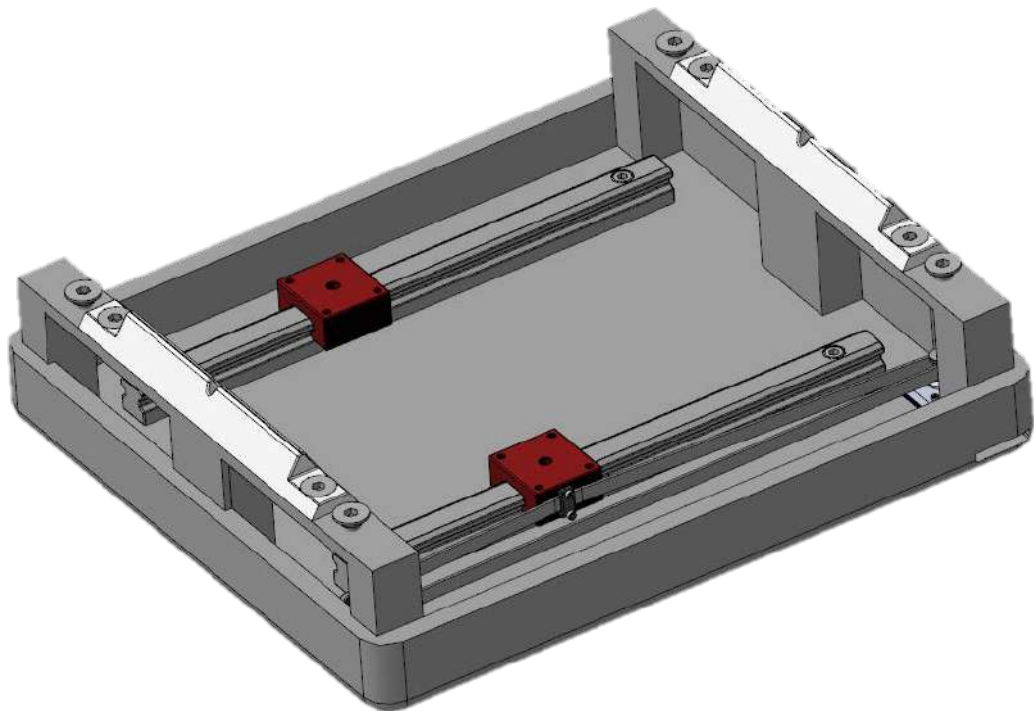


Рисунок 41 – Механизм перемещения вдоль одной оси

Для реализации перемещения вдоль вертикальной оси разработано крепление, представленное на рисунке 42.

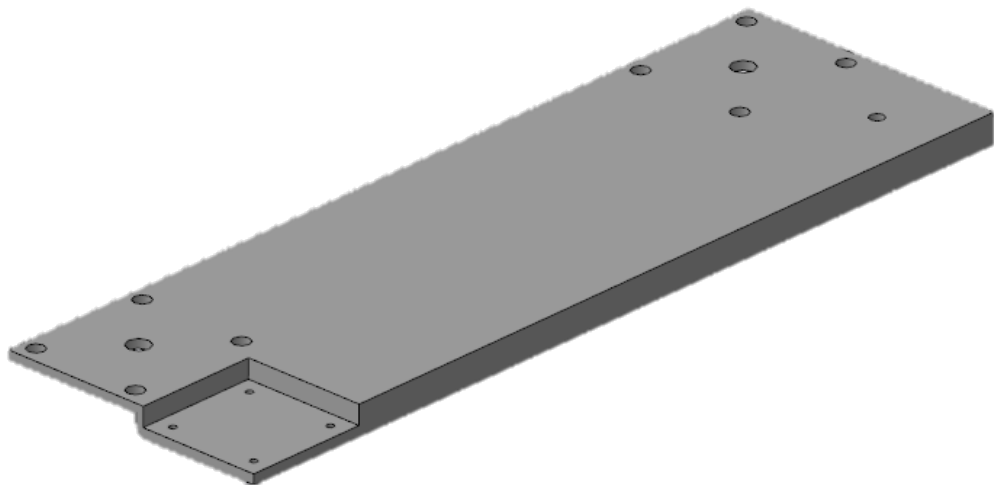


Рисунок 42 – Крепление

С помощью этого крепления реализуется механизм перемещения, аналогичный описанному выше. Общий вид механизма перемещения можно увидеть на рисунке 43.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

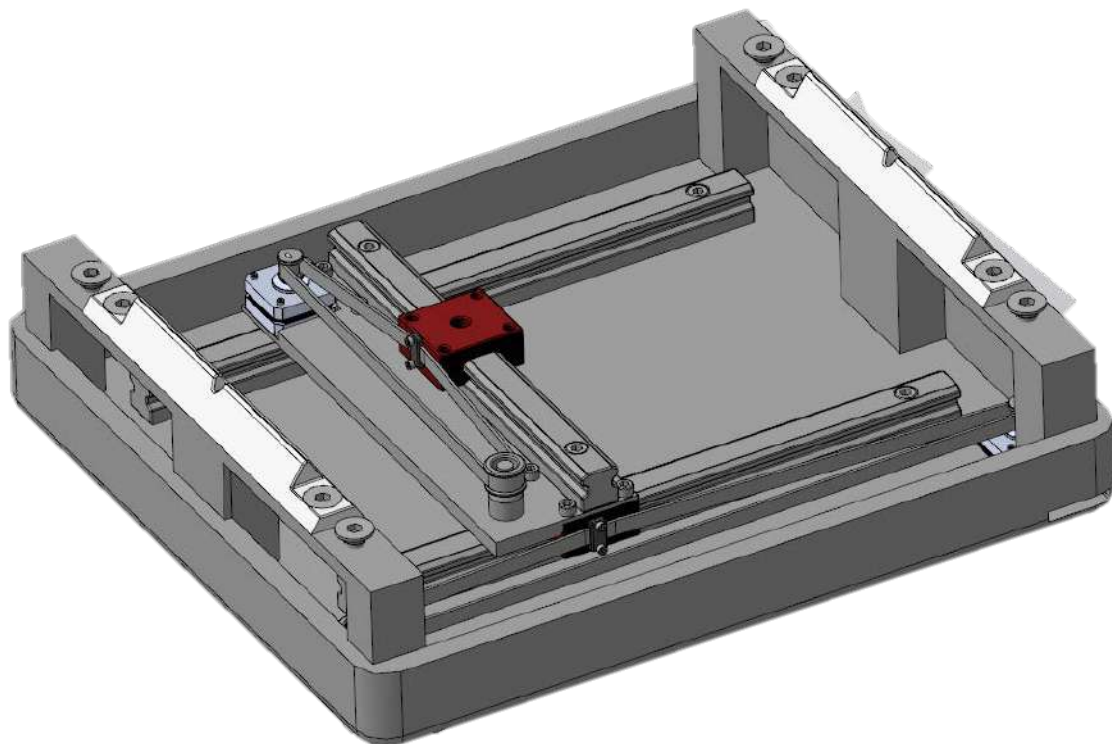


Рисунок 43 – Механизм перемещения датчика

Было разработано крепление, с помощью которого реализовывается фиксация датчика на каретке (Рисунок 44).

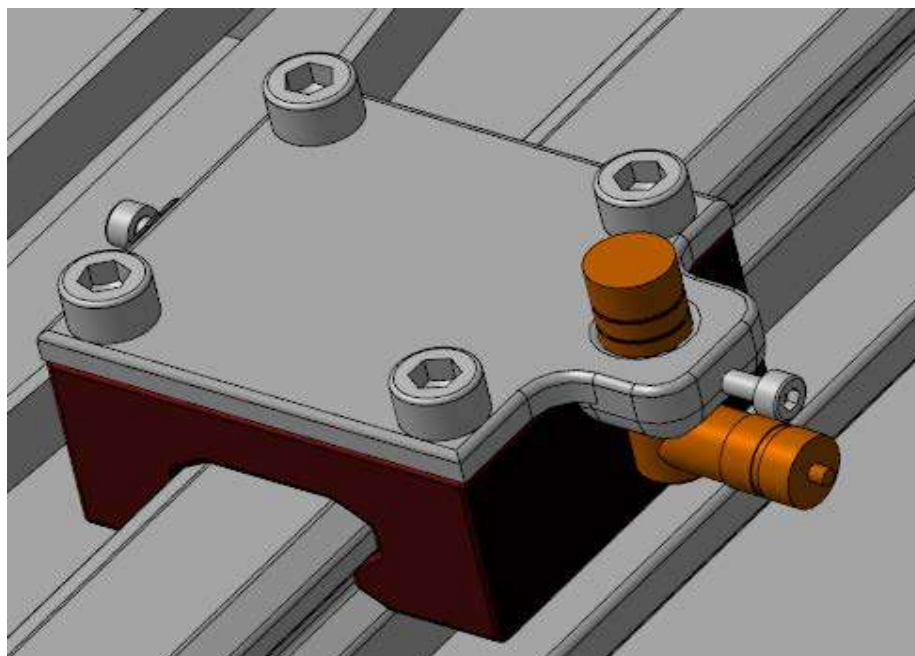


Рисунок 44 – Датчик, закрепленный на платформе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

К креплению датчик прижимается винтом М3х10 ГОСТ 4762-2012 [12]. Крепление прижимается четырьмя винтами М6х20 ГОСТ 4762-2012 [12].

### 3.4. Формирование механизма для создания нагрузки

Реализован механизм, с помощью которого происходит приложение силы к исследуемому объекту. Механизм представлен на рисунке 45.

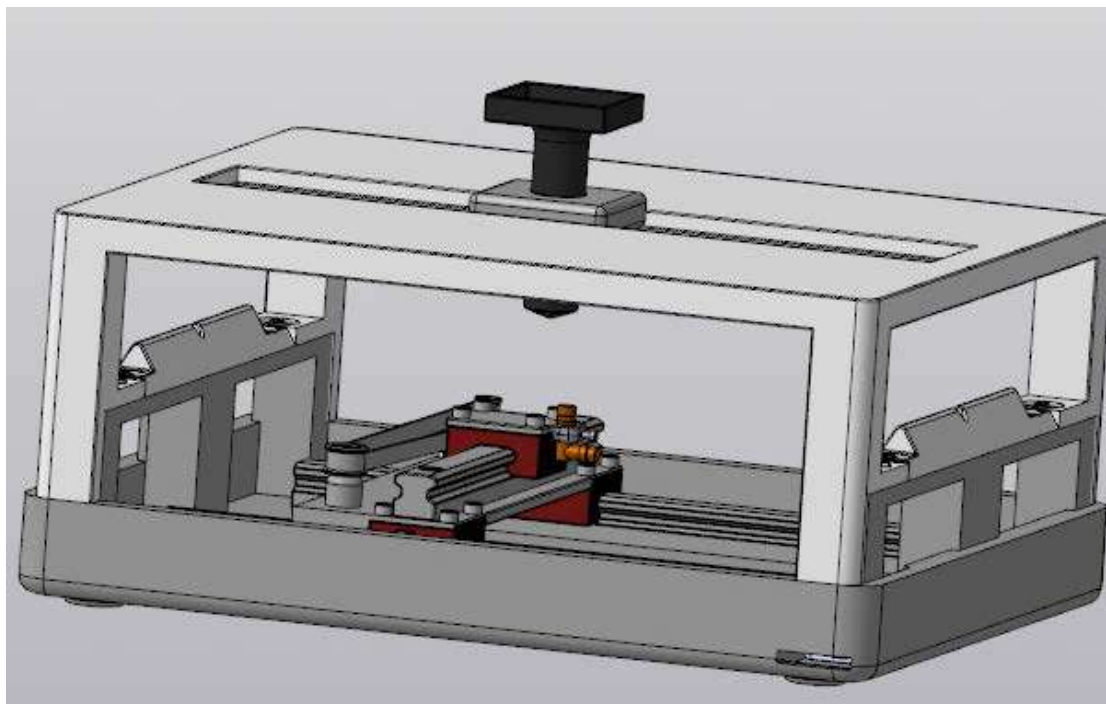


Рисунок 45 — Общий вид стенда

### 3.5. Датчик Capacdt 6019

Емкостная измерительная система CapaNCDT – это одноканальная система, использующая технологию SMD со встроенным соединительным кабелем. Все электропроводящие материалы могут быть использованы в качестве объектов для измерения. Емкостный принцип измерения обеспечивает высокую точность измерений. Система не требует больших затрат электроэнергии, возможно подключение от батареи.

Напряжение питания для датчика от 12 до 18 вольт постоянного напряжения. Выходной сигнал варьируется от 0 до 10 вольт.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

Основные технические параметры датчика:

Тип.....	Сарандт 6019
Диапазон измерений, мм.....	0.2–10мм
Линейность характеристики, % от диапазона измерений.....	±0,05
Разрешающая способность статика, 2 Гц / динамика 8 кГц, нм...1,5 / 40	
Активная область измерения, мм.....	4,4
Минимальный размер мишени, мм.....	ø17
Масса, г.....	50
Тип подключения.....	угловой
Диапазон рабочих температур, °С.....	-50...+200

Датчик поставляется в комплекте с АЦП. Внешний вид АЦП представлен на рисунке 46.



Рисунок 46 – Датчик и АЦП

Габаритные размеры представлены на рисунке 47.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

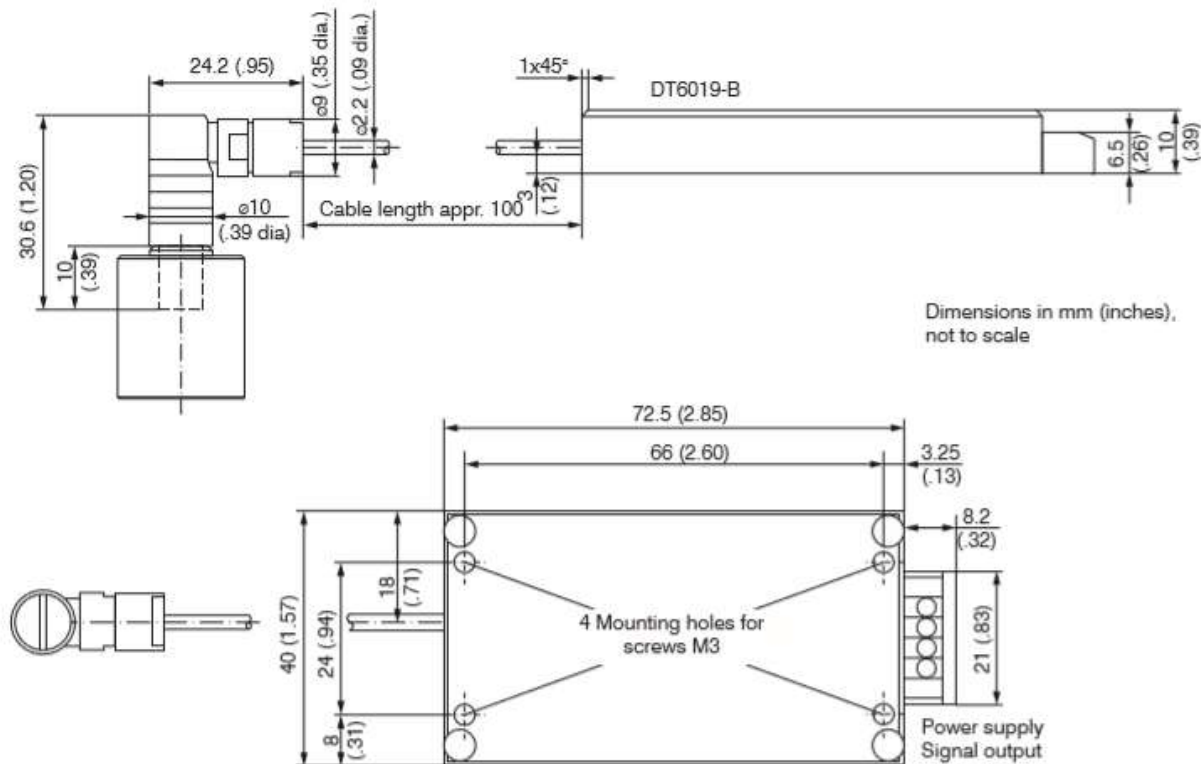


Рисунок 47 – Габаритные размеры датчика и АЦП

### 3.6. Формирование блока управления механизмом перемещения.

Управление перемещением датчика линейных перемещений реализовано с помощью четырёх кнопок, закрепленных в крышке корпуса блока управления.

Для управления используются четыре кнопки на 3А,12В, а также LCD дисплей, идущий в базовом комплекте для изучения Arduino. Эти элементы закреплены в крышке блока управления (Рисунок 48)

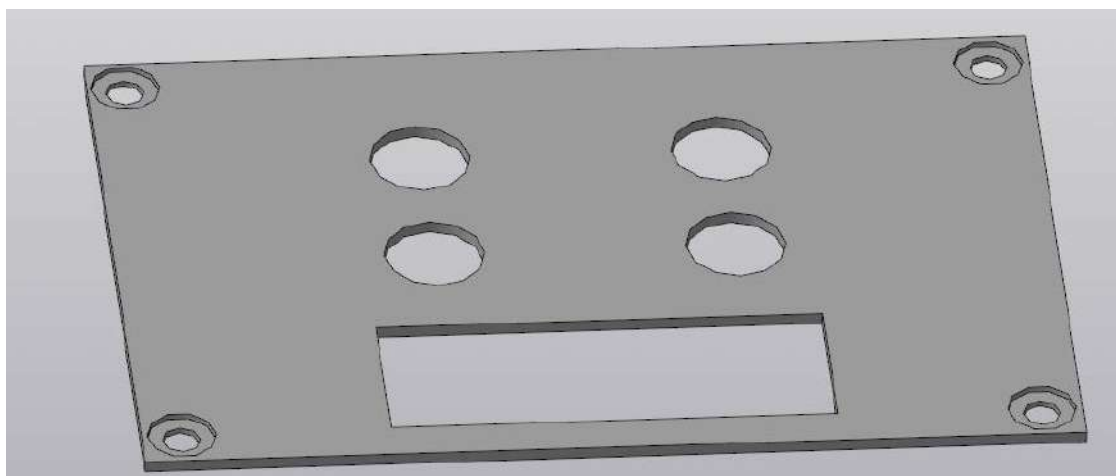


Рисунок 48 – Крышка блока управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



Основная часть, в которой располагаются электронные компоненты выполнена в форме прямоугольника, имеющего вырезы под вывод проводов (Рисунок 49).

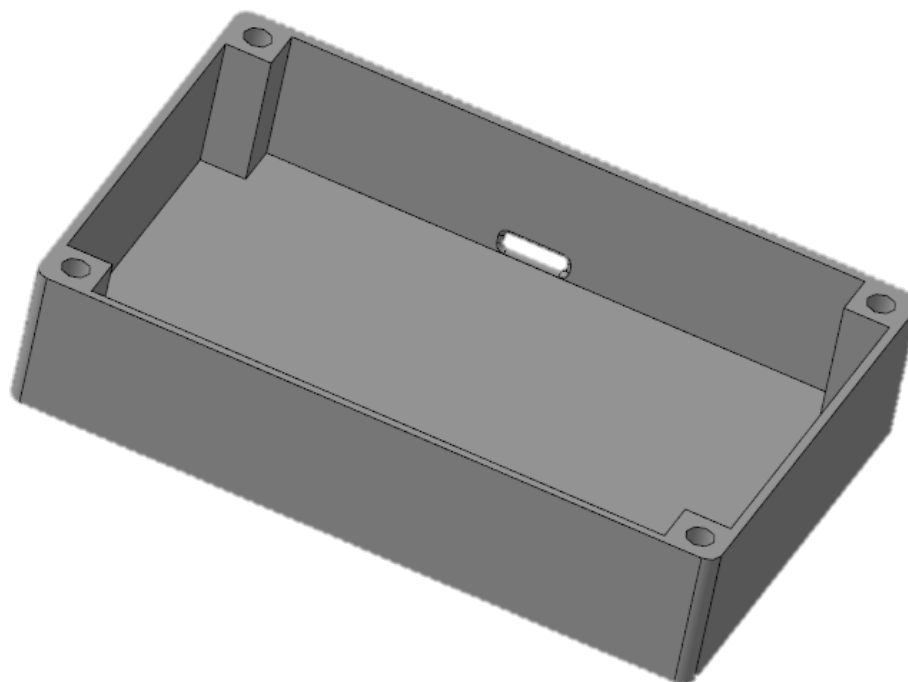
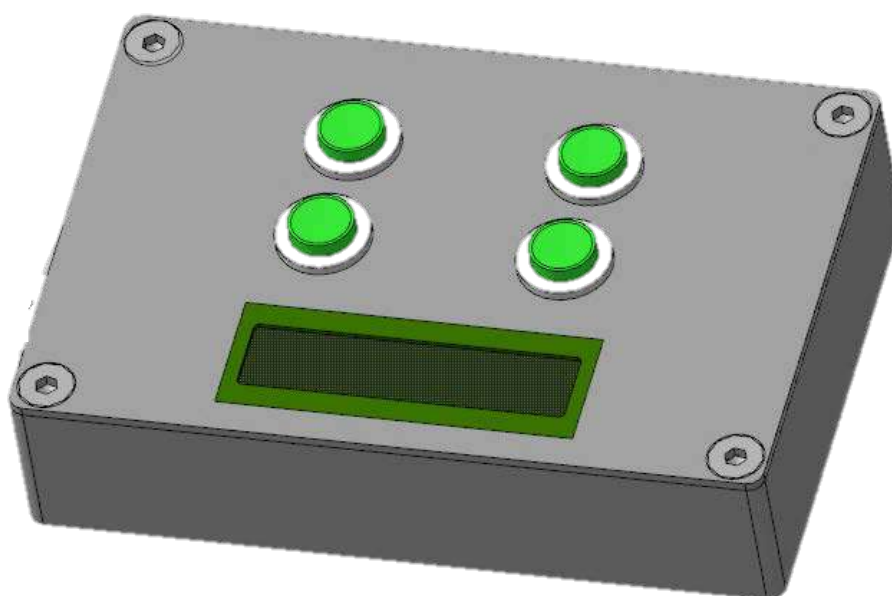


Рисунок 49 – Нижняя часть корпуса

Корпус, с установленными на нём элементами управления имеет вид, представленный на рисунке 50:



Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

## Рисунок 50 – Внешний вид собранного корпуса

Общий вид установки представлен на рисунке 51:

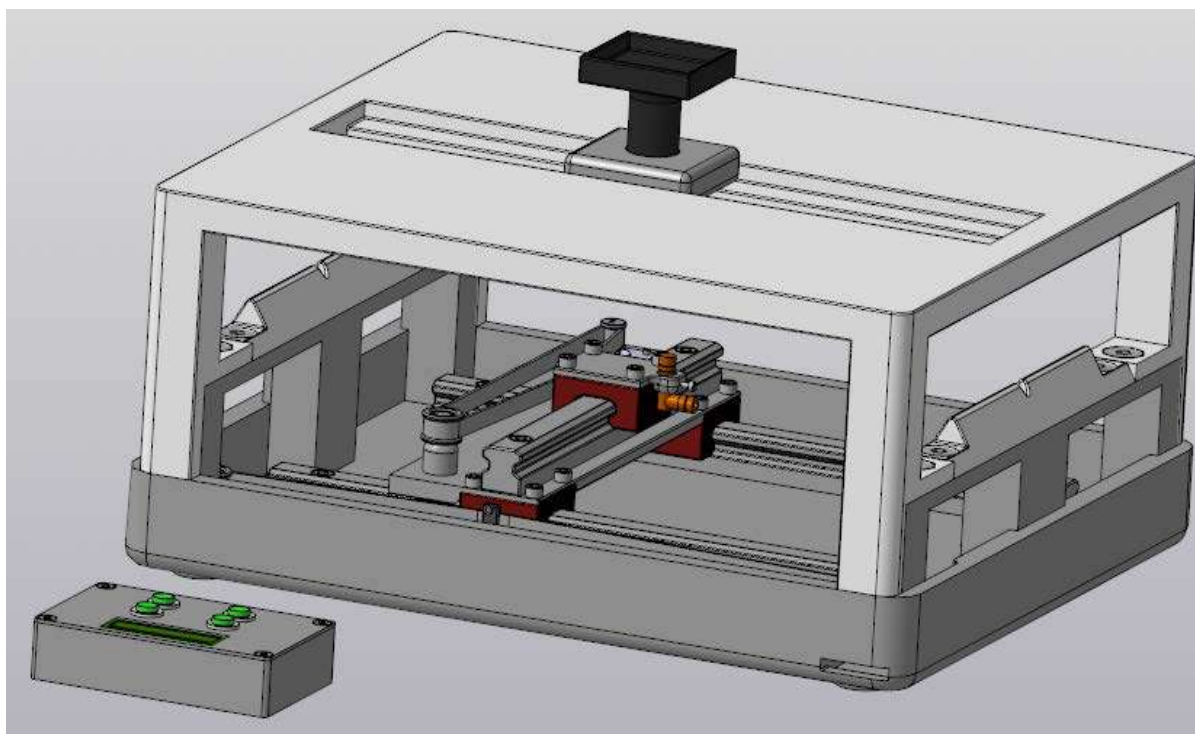


Рисунок 51– общий вид установки

### 3.7.Руководство по эксплуатации

Руководство по эксплуатации в соответствии с ГОСТ 2.601-2006 – документ, который содержит сведения о конструкции, принципе действия, характеристиках (свойствах) изделия, его составных частях и указания, необходимые для правильной и безопасной эксплуатации изделия. Использования по назначению, технического обслуживания, текущего ремонта, хранения и транспортирования и оценок его технического состояния при определении необходимости отправки его в ремонт, а также сведения по утилизации изделия и его составных частей [21].

#### **Методика выполнения работы.**

Приборы и принадлежности:

- 1) Лабораторный стенд, включающий в себя микроконтроллер Arduino, датчик линейных перемещений, два шаговых двигателя, два драйвера для шаговых двигателей АЦП для датчика линейных перемещений.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата



- 2) Блок питания 220В, 50Гц имеющий выводы с напряжениями 5В, 12В, 3.3В.
- 3) Балки различных сечений, пластины с различными рёбрами жесткости, штангенциркуль.

**Порядок выполнения работы:**

- 1) сделать замеры исследуемых объектов.
- 2) рассчитать прогибы балок при различных нагрузках по формулам:

Реакции в опорах:

$$R_A = \frac{Pb}{L};$$

$$R_B = \frac{Pa}{L},$$

где  $P$  – сила нажатия на балку;

$b$  – расстояние от правого края балки до точки приложения силы;

$a$  – расстояние от левого края балки до точки приложения силы;

Прогиб:

$$v = \frac{Pa^2b^2}{3EJL},$$

где  $a$  – расстояние от левого края балки до точки приложения силы;

$b$  – расстояние от правого края балки до точки приложения силы;

$L$  – длина балки;

$E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена балка;

$J$  – момент инерции сечения балки.

3) поместить исследуемую балку на стенд. Приложить необходимые усилия к балке. Снять значения прогиба в различных точках.

4) построить графики зависимостей:

- прогиба от силы нажатия;

- прогиба балки различных точках при постоянной нагрузке.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

5) поместить исследуемую пластину на стенд. Разметить 15 точек на пластине, в которых будут сниматься показания прогиба пластины. Провести исследование на прогиб пластины на стенде.

6) построить графики изгиба пластин в трёх координатах. Оценить влияние ребер жесткости определенной формы на жесткость пластины.

7) провести моделирование практической работы в прикладном пакете SolidWorks Simulation, оценить погрешность моделирования в SolidWorks, по сравнению с реальным экспериментом.

8) сделать выводы о жёсткости и целесообразности использования каждого из исследуемых объектов в конструировании приборов.

**Выводы по разделу три:** в процессе разработки стенда был реализован двухосевой механизм перемещения датчика линейных перемещений. Также был разработан блок управления установкой. Управление механизмом перемещения реализуется с помощью четырёх кнопок. Первая пара отвечает за перемещения механизма вдоль продольной оси, вторая пара – за перемещение вдоль перпендикулярной ей оси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе найдены два аналога и один патент. Были выявлены недостатки аналогов. Главным недостатком аналогов является отсутствие каких-либо цифровых датчиков. В установке для определения перемещений поперечных сечений статически определимой балки ТМг 12М снятие информации идёт с помощью аналоговых индикаторов часового типа, что обеспечивает малую точность измерений. В установке Taber model 150-B снятие информации идёт так же без участия цифровых датчиков. Был найден патент Патент 478204 Способ измерения жесткости упругих элементов. В патенте описывается способ измерения жёсткости, что позволяет оценить жесткость того или иного исследуемого объекта.

Во втором разделе были рассчитаны прогибы балок. Были построены графики зависимости прогиба от силы нажатия, также были построены графики, по которым можно увидеть прогиб балки на определённом расстоянии от её края. Так же был проведён анализ пластин в программной среде SolidWorks Simulation. В ходе анализа наблюдались различные типы колебаний пластин на их резонансных частотах, оценивалось влияние ребер жёсткости на резонансные частоты и деформацию пластин. Был исследован корпусной элемент персонального компьютера, проведён её статический анализ. Была оценена погрешность модели в целом.

В третьем разделе в процессе разработки стенда был реализован двухосевой механизм перемещения датчика линейных перемещений. Также был разработан блок управления установкой. Был реализован механизм, с помощью которого нагрузка точно прикладывается к исследуемому объекту.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Установка для определения линейных перемещений поперечных сечений статически определимой балки ТМТ 12М. – [http://newstyle-y.ru/high-school/applied/tipovojj-komplekt-oborudovanija-po-kursu-prikladnaja-mekhanika-tmt-m/item\\_3173/](http://newstyle-y.ru/high-school/applied/tipovojj-komplekt-oborudovanija-po-kursu-prikladnaja-mekhanika-tmt-m/item_3173/).
2. TABER® V-5 Stiffness Tester – Model 150-B. – <https://www.taberindustries.com/stiffness-tester>.
3. Заявка 478204 Союз Советских Социалистических Республик, МПК G01L 1/04. Способ измерения жесткости упругих элементов / Л.Г.Алдонов. - № 1462988; заявл. 24.07.1970; опубл. 27.05.1975, Бюл. №2. – 3 с.
4. Ильинский, В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. / В.С. Ильинский. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.
5. Гурин, В.В. Детали машин. Курсовое проектирование: учебник / В.В. Гурин, В.М. Замятин, А.М. Попов. – М.: Юрайт, 2009. – 296 с.
6. Биргер, И.А. Конструкции из алюминиевых сплавов: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
7. Орлов, П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. / П.И. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
8. Элементы приборных устройств (Основной курс): учебное пособие. Ч.1: Детали, соединения и передачи / Тищенко О.Ф., Киселев Л.Т., Коваленко Л.П. и др.; под ред. О.Ф. Тищенко. – М.: Высш. школа, 1982. – 304 с.
9. Яковлев, К.П. Краткий физико-технологический справочник / К.П. Яковлев. – М.: Фиизматлит, 1960. – 413 с.
10. Олофинская, В.П. Техническая механика: курс лекций. / В.П. Олофинская. – М.: Форум - Инфра-М, 2007. – 344 с.
11. Будур, А.И. Справочник конструктора. Стальные конструкции. / А.И. Будур, В.Д. Белогуров. – Киев: Сталь, 2004. – 211 с.
12. ГОСТ Р ИСО 4762-2012. Винты с цилиндрической головкой и

шестигранным углублением под ключ. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 8 с.

13. ГОСТ Р ИСО 10642-2012 Винты с потайной головкой и шестигранным углублением под ключ. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 6 с.

14. ГОСТ Р ИСО 12474-2012 Винты с цилиндрической головкой и шестигранным углублением под ключ. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 10 с.

15. ГОСТ 10058-90. Подшипники шариковые радиальные однорядные. Основные размеры. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.

16. ГОСТ 23831-79 Ремни плоские приводные резиноканевые. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 17 с.

17. ГОСТ 2.601-2006 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 58 с.

18. ГОСТ 1145-80 Шурупы с потайной головкой. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 12 с.

19. Михайлов, Л.Г. Методы и средства натурной тензометрии / Л.Г. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.

20. Сергеев, А.Г. Стандартизация и сертификация: учебник / А.Г. Сергеев, В.В. Терегеря. — М.: Юрайт, 2019. – 323 с.

21. ГОСТ 11644-75 Винты с цилиндрической скругленной головкой классов точности А и В. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

22. ГОСТ 5929-70 Гайки шестигранные низкие класса точности А. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 12 с.

23. Элементы приборных устройств (Основной курс): учебное пособие. Ч.2: Приводы, преобразователи, исполнительные устройства / Тищенко О.Ф., Киселев Л.Т., Коваленко Л.П. и др.; под ред. О.Ф. Тищенко. – М.: Высш. школа, 1982. – 263 с.