

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)
Вышая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, д.т.н., профессор

_____ / А.Н. Лысов /

« ____ » _____ 2018 г

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____ / А.Л. Шестаков /

« ____ » _____ 2018г

Разработка датчика давления с емкостной ячейкой с применением новых технологий 3D печати

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-525. ВКР

Руководитель, к.т.н, доцент

_____ / Д.А. Кацай /

« ____ » _____ 2018 г.

Автор

студент группы КЭ–225

_____ / А.А. Дубровина /

« ____ » _____ 2018г.

Нормоконтролер, к.т.н, доцент

_____ / А.С. Волосников /

« ____ » _____ 2018г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ТЕОРИЙ, КОНЦЕПЦИЙ, МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 Обзор литературы.....	9
1.2 Методы исследования напряженного состояния	10
1.3 Методика исследования – метод конечных элементов	11
1.4 Прототипы и аналоги	12
1.5 Обзор методов 3D печати	19
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО СВОЙСТВ.....	28
2.1 Создание 3D модели датчика давления в программе SolidWorks	28
2.2 Конвертирование файла модели в STL-файл с учетом особенностей печати деталей	41
2.3 Разделение каждой детали на слои толщиной определяемой точностными требованиями к датчику давления и толщиной слоя, реализуемой на 3D принтере.....	44
2.4 Требования к технологическому процессу сборки датчика давления	47
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	49

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

4 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ НОВЫХ НАУЧНЫХ ИДЕЙ, КОНЦЕПЦИЙ, НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	66
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	79
ПРИЛОЖЕНИЕ В	86

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
						6
						Изм.

ВВЕДЕНИЕ

Давление – это важный параметр систем контроля и управления производственными процессами. Измерение давления важно так же для робототехники как привод, или как заменитель прямого контакта (например, в тактильных датчиках) для определения формы или расчета сил захватывания.

Датчик давления — устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления измеряемой среды (жидкости, газы, пар). Главным отличием одних приборов от других является точность регистрации давления, которая обуславливается принципом преобразования давления в электрический сигнал: тензометрический, пьезорезистивный, емкостной, индуктивный, резонансный, ионизационный.

В данной работе представлен емкостной датчик давления.

Емкостные датчики используют метод изменения емкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые емкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости [4].

Актуальность данной работы заключается в применении аддитивных технологий при изготовлении производстве ракетных силовых установок, деталей для вертолетных двигателей нового поколения. В работе [21] Любимов В.В. и Саломатников М.С. проанализировали возможности современных технологий послойного изготовления полимерных изделий с оценкой точности размеров и качества их поверхностей.

Использование аддитивных технологий значительно сэкономит финансовые средства и время, сократит цикл производства [19].

Цель: Разработка элементов датчика давления с емкостной ячейкой с применением аддитивной технологии.

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист

7

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
------	----------	-------	-----

для MCAD систем, а также приведены результаты предварительных испытаний макета датчика в диапазоне температур от -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Погрешность моделирования не превышает 4,5 %, выбранный вариант конструкции датчика давления является работоспособным в указанном температурном диапазоне [25].

Исследователи из Массачусетского технологического института открыли новые возможности 3D-печати: способность печатать оптически прозрачные стеклянные предметы. Напечатанные с использованием разработанной высокотемпературной технологии стеклянные объекты являются прочными и полностью прозрачным для света. Объекты можно предварительно моделировать в компьютерной программе проектирования, аналогично другим существующим в настоящее время 3D-принтерам [43].

М.А. Горбовец, А.Г. Евгенов, И.А. Ходинев, М.И. Лукьянова исследовали малоцикловую и многоцикловую усталость жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом SLM, при рабочих температурах сплавов [7].

М.В. Силуянова, Т.Р. Дзгоев в 2015 году провели работы по оптимизации силового элемента энергетической установки космических кораблей нового поколения, по результатам которых было выявлено, что переход от классического метода изготовления деталей к использованию 3D печати значительно уменьшает сроки изготовления, а также способствуют уменьшению веса детали до 35% [33].

Д.К. Федорова, Д.В. Иволга, В.П. Алексеев, А.В. Балякин исследовали влияние направления послойного лазерного сплавления (selective laser melting - SLM) на механическую обработку образцов из нержавеющей стали 316L. По экспериментальным данным построены зависимости усилия резания от скорости, глубины резания и подачи [35].

1.2 Методы исследования напряженного состояния

SolidWorks (Солидворкс) — программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и

Инь. №	Подп. и дата
Инь. №	Подп. и дата
Инь. №	Подп. и дата
Инь. №	Подп. и дата
Инь. №	Подп. и дата

технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Работает в среде MicrosoftWindows. Разработан компанией SolidWorksCorporation, созданной с нуля Джоном Хирштиком, а с 1997 года являющейся независимым подразделением компании DassaultSystemes (Франция). Программу начали разрабатывать в 1993 году, она начала продаваться в 1995 и составила конкуренцию таким продуктам, как AutoCADи AutodeskMechanicalDesktop, SDRC I-DEAS и Pro/ENGINEER. Система SolidWorks стала первой САПР, поддерживающей твердотельное моделирование для платформы Windows.

Решаемые задачи:

- конструкторская подготовка производства (КПП);
- технологическая подготовка производства (ТПП);
- управление данными и процессами.

Система включает программные модули собственной разработки, а также сертифицированное ПО от специализированных разработчиков (SolidWorks Gold Partners) [47].

В SolidWorks с помощью уравнений напряженно-деформированного состояния твердых тел и уравнений движения и теплообмена текучей среды моделируются физические процессы; методы решения этих уравнений: метод конечных элементов и метод конечных объемов.

1.3 Методика исследования – метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) сейчас является эталоном при решении задач механики твердого тела при помощи численных алгоритмов. В основе метода лежит дискретизация объекта для того, чтобы решить уравнения механики сплошной среды предполагая, что эти соотношения осуществляются в рамках каждой из элементарных областей. Эти области называются конечными элементами. Они могут соответствовать реальной части пространства, как,

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №

например, пространственные элементы, или же быть математической абстракцией, как элементы стержней, балок, пластин или оболочек. В рамках конечного элемента определяются свойства ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики жесткости и прочности материала, плотность и т.д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике твердого тела это перемещения, деформации, напряжения и т.д.). Характеристики из второй группы определяются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых необходимые значения можно рассчитать в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента заключается в том, чтобы связать существующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, чаще всего, перемещения и усилия.

1.4 Прототипы и аналоги

История применения емкостного сенсора насчитывает уже более 40 лет. Впервые емкостный метод для измерения давления был успешно применен в 1969 году, в датчиках Rosemount. Именно тогда был создан легендарный датчик давления Rosemount 1151, ставший бестселлером. Несколько лет назад началось активное замещение датчиков Rosemount 1151 семейством более современных приборов Rosemount 2051, Rosemount 3051 и Rosemount 3051S [44].

Емкостная ячейка датчика давления (Рисунок 1) образована двумя цилиндрическими основаниями 1, между которыми расположена плоская металлическая мембрана 2. На торцах цилиндрических оснований, обращенных к поверхности мембраны, имеются диэлектрические вкладыши 3 с тонкопленочными металлическими электродами 4. Цилиндрические основания и мембрана сварены между собой по наружному контуру, образуя симметричную и прочную конструкцию ячейки. Таким образом, между металлической мембраной

Инв. №	Подп. и дата					12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист 12
	Взам. инв.						
	Инв. №						
	Подп. и дата						
		Изм.	№ докум.	Подп.	Дат		

и электродами, расположенными по обе стороны от нее, образованы две емкости конденсаторов.

При перемещении мембраны под действием измеряемого давления происходит увеличение емкости одного из конденсаторов и уменьшение емкости другого. Это дифференциальное изменение емкостей ячейки под действием давления преобразуется и обрабатывается в электронном устройстве датчика.

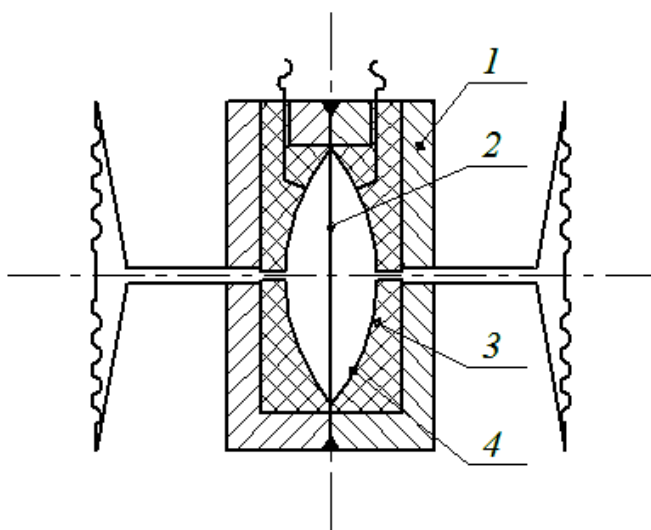


Рисунок 1 – Емкостная ячейка

Представим несколько датчиков давления с емкостной ячейкой различных производителей, в том числе и зарубежных.

Датчик давления Метран-150 компании Метран

Датчики давления серии Метран-150 предназначены для непрерывного преобразования в унифицированный токовый выходной сигнал и/или цифровой сигнал в стандарте протокола HART входных измеряемых величин:

- избыточного давления;
- абсолютного давления;
- разности давлений;
- давления-разрежения;

Инь. №	Инь. №	Инь. №	Инь. №	Инь. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.

- гидростатического давления (уровня).

Управление параметрами датчика:

- с помощью HART-коммуникатора;
- удаленно с помощью программы HART-Master, HART-модема и компьютера или программных средств АСУТП;
- Локального интерфейса оператора
- удаленно с помощью AMS.

Особенности и преимущества:

- Улучшенный дизайн и компактная конструкция.
- Поворотный электронный блок и ЖКИ.
- Высокая перегрузочная способность.
- Защита от переходных процессов.
- Внешняя кнопка установки "нуля" или кнопки аналоговой настройки "нуля" и "диапазона".
- Непрерывная самодиагностика [14].

Датчик давления HMP 331 компании BD Sensors RUS

Датчик HMP 331 сочетает в себе новейшие достижения микропроцессорной электроники и технологии аналоговых сенсоров. Цифровой усилитель выполнен на базе 16 разрядного аналого-цифрового преобразователя. Благодаря АЦП возможна активная компенсация характеристик датчика, таких как нелинейность и температурная погрешность. Цифро-аналоговый преобразователь формирует выходной сигнал на уровне 4...20 мА. Кроме того, возможна ручная подстройка датчика в режиме цифрового управления (HART). Датчик и электронный усилитель смонтированы в литом алюминиевом вибро- и ударопрочном корпусе. Канал измерения давления выполнен из нержавеющей стали. Механическое присоединение к процессу обеспечено посредством резьбового соединения, которое может быть выполнено в различных вариантах. Электрическое подключение осуществляется при помощи обжимного соединения и PG фитинга.

Инд. №	Подп. и дата					12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист 14
	Взам. инв.						
	Инд. №						
	Подп. и дата						
Инд. №	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат			

Поскольку датчик обладает особой конструкцией и выполнен в соответствии с требованиями по классу защиты IP67, гарантируется его устойчивая работа в сложных условиях. НМР 331 пригоден для работы в средах неагрессивных к нержавеющей стали марки 1.4571/1.4435 [15].

Перенастраиваемые цифровые датчики разности давлений моделей EJA110E/120E/130E группы компаний «Эталон»

Отличительные черты и преимущества:

- высокая надежность и приспособленность к промышленным условиям эксплуатации;
- защита от односторонней перегрузки (дополнительная погрешность не более $\pm 0,03\%$ ВПП/16 МПа) для капсул M,N,V. Для капсул F, L дополнительная погрешность производителем не нормируется;
- полностью цифровая обработка сигнала с сенсора, расширенная самодиагностика;
- лучшее в мире соотношение цена/качество, минимальная стоимость владения.

Типовые применения:

- измерение перепада давления на первичных преобразователях расходомерных комплексов (осредняющие напорные трубки и т. д.);
- измерение избыточного давления и разрежения;
- измерение уровня, массы и плотности жидкости в резервуарах;
- в сборе с мембранным разделителем – измерение давления коррозионно-активных, вязких, высокотемпературных сред.

Конфигурирование: изменение параметров (шкала, постоянная демпфирования и пр.) осуществляется посредством HART-коммуникатора (в случае наличия у датчика кода выходного сигнала J – аналоговый 4...20 мА +

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Взам. инв.
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

HART 7-протокол), либо с помощью FieldMate (программного комплекса на базе ПК) и USB модема (HART/BRAIN, HART) [40].

LD301 Датчик давления HART ООО «Новые технологии»

Датчики давления HART LD301 – это целая линейка различных преобразователей уровня, перепада давления, избыточного и абсолютного давления. Модели включают в себя присоединения через клапанный блок и санитарный фланец для измерения уровня жидкости, датчик гидростатического давления в резервуаре (модель HTG301T) и различные исполнения по материалам, контактирующим с измеряемой средой. Программное обеспечение CONF401 – это отличное средство управления для HART датчиков LD301 .

- Обмен данными в пределах 100 мс с уровнем 0.75 μ A/бит;
- Улучшенная производительность, благодаря встроенному математическому со-процессору;
- Режим работы Multi-drop;
- ПИД регулирование;
- Поддержка DTM и EDDL;
- Измерение расхода в прямом и обратном направлениях;
- Нарботка на отказ (FMEDA, MTBF) 244 года [42].

SITRANS P DSIII компании Siemens

SITRANS P DSIII предназначен для измерения дифференциального, абсолютного, избыточного (относительного) давления и измерения гидростатического уровня.

Преобразователи существуют во взрывозащищенном исполнении. SITRANS P DSIII имеют выходной сигнал 4...20мА +HART или интерфейс PROFIBUS-PA или FOUNDATION Fieldbus. Настройка параметров может осуществляться как

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	Инд. №	Подп. и дата	Взам. инв.	Инд. №	Подп. и дата	Инд. №
------	----------	-------	-----	--------	--------------	------------	--------	--------------	--------

12.04.01.2018.525 ПЗ

дистанционно по цифровому протоколу, так и локально с помощью 3-х кнопок местного индикатора [45].

JUMO dTRANS p02 DELTA компании Jumo

Интеллектуальный преобразователь давления JUMO dTRANS p02 DELTA предназначен для измерения разности давлений газов, паров и жидкостей, а также измерения расхода, уровня в закрытых емкостях и измерения малых значений избыточного давления.

Основные технические характеристики

Сенсор: мембрана из нерж. стали, пьезорезистивный принцип измерения

Диапазоны измерения: -60...+60 мбар ; -250...250 мбар, -1...1 бар, -1...4 бар, -1...25 бар DP

Перенастройка диапазона измерений: до 100:1

Выходной сигнал: 4-20 мА + HART

Погрешность: 0,5%; 0,2%; 0,1%

Межповерочный интервал: до 4 лет

Температура измеряемой среды: -40...+120°C

Температура окружающей среды: -50...+85°C

Конструктивное исполнение:

- стандартное, IP 65
- искробезопасное (Exia), IP 65
- взрывонепроницаемая оболочка (Ex d), IP 65

Корпус: из алюминия, с кнопками управления под крышкой, с ЖК-дисплеем.

Подключение к процессу:

- 2x 1/4" NPT
- мембранный разделитель по DIN/ANSI [41].

Датчики перепада давления STD800 компании Honeywell

Инв. №	Подп. и дата					12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист 17
	Взам. инв.						
	Инв. №						
	Подп. и дата						
	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат			

Датчик дифференциального давления STD800 серии SmartLine® представляет собой высокопроизводительный датчик пьезорезистивного типа. Объединяя измерение перепада давления со встроенной компенсацией статического давления и температуры, STD800 обеспечивает высокую точность и стабильность показаний в широком диапазоне давлений и температур. Датчики давления Серии SmartLine полностью протестированы с платформой Experion PKS, что гарантирует их полную совместимость и интеграцию. Датчики SmartLine обеспечивают высокоточное и надежное измерение давления даже в самых сложных применениях [16].

Прототипом для разрабатываемого датчика выберем датчик разности давлений Метран – 150 CD. Т.к. он обладает следующими преимуществами:

- симметричность конструкции, которая обеспечивает одинаковое количество заполняющей жидкости со стороны камер высокого и низкого давления. Таким образом, при изменении температуры жидкость расширяется равномерно, что со стороны высокого давления, что со стороны низкого давления, обеспечивая взаимную компенсацию температурной погрешности;

- наиболее важным параметром конструкции является объем заполняющей жидкости: чем он меньше, тем меньше влияние заполняющей жидкости на точность показаний от расширения/сжатия под воздействием статического давления и температуры. Если в традиционной конструкции датчиков объем заполняющей жидкости равен $\sim 5 \text{ см}^3$, то в Метран-150 этот объем снижен до $0,2 \text{ см}^3$;

- «свободно плавающий сенсор» – емкостная ячейка не имеет жесткой кинематической связи с корпусом модуля, ячейка всего лишь подвешена на двух капиллярах, данное решение снижает влияние механических напряжений в корпусе прибора при затяжке монтажных фланцев. Также оно снижает влияние вибрации, обеспечивая лучшие метрологические характеристики на таких

Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.

применениях, ведь вибрации присутствуют практически во всех технологических процессах;

- благодаря прецизионному изготовлению ячейки отсутствует остаточная деформация оболочки мембраны после снятия перегрузочного давления. А значит, метрологические характеристики датчиков Метран-150 и Rosemount после воздействия давления остаются без изменений.

1.5 Обзор методов 3D печати

Таблица 1 – Развитие технологии 3D печати [36].

Год	Создатели, компании	Новые возможности и знания
1	2	3
1984	Ч. Халл (США) [20], 3D Systems, Artisan Make	Технология “ <u>стереолитографии</u> ” (SLA) для печати 3D объектов по данным цифровых моделей из <u>фотополимеризующихся</u> композитных материалов
1986	К. Декарт и Д. Биман (Университет Техаса), 3D Systems	Разработка и получение патента на метод селективного лазерного спекания (SLS)
1993	<u>SolidScape</u> [18]	Изготовление объемных деталей с помощью струйных принтеров; понятие 3Dпечати
1995	<u>ObjetGeometries</u> , <u>Stratasys</u>	Создание моделей высокой точности путем послойного нанесения материала; технология <u>PolyJet</u> , <u>ObjetConnex</u>

Инва. №	Инва. №	Инва. №	Инва. №	Инва. №
Подп. и дата	Взам. инв.	Инва. №	Подп. и дата	Инва. №

Окончание таблицы 1

1	2	3
2005	А. <u>Боуэр</u> (Великобритания), 3D Systems, Desktop Factory, Z Corporation	Создание <u>самопроизводящих</u> машин, использующих биоматериалы (<u>Reprap</u>)
2005	А. <u>Боуэр</u> (Великобритания), <u>Wanhao</u> , 3D <u>Systems</u> , <u>MBot</u> , <u>JoysMaker</u>	Создание всех настольных принтеров, использующих метод моделирования путем послойного наплавления (FDM) (<u>Reprap 0.2</u>)
2008	<u>ObjetGeometriesLtd</u>	Разработка принтера Connex500, способного печатать несколькими различными материалами сразу (3DP)
2010	<u>Organovo</u>	Создание технологии печати искусственных кровеносных сосудов
2011	<u>Ultimaker</u> (Голландия), <u>SeeMeCNC</u> , 3D Systems	Увеличение скорости трехмерной печати до 350 мм в секунду

Для наглядности сведем методы в таблицу (Таблица 2).

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ					Лист									
											Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	20				

Таблица 2 – Методы 3D печати [34, 5].

Методы 3D печати	Используемый материал	Достоинства метода	Недостатки	Цена печати
1	2	3	4	5
<i>Стереолитография (Stereolithography Apparatus SLA)</i>	жидкий фотополимер, в который добавлен специальный реагент-отвердитель.	<ul style="list-style-type: none"> • высокое разрешение печати; • возможность изготовления моделей больших размеров; • высокая механическая прочность; • малое количество отходов; • легкость финишной обработки 	<ul style="list-style-type: none"> • ограниченный выбор материалов; • отсутствует выбор цветов и комбинирование разных материалов в одном цикле; • низкая скорость печати; • очень большие габариты и вес 	Принтеры – сотни тысяч долларов; расходные материалы – две-три тысячи долларов за картридж
<i>Выборочное лазерное спекание (Selective Laser Sintering SLS)</i>	порошок с диаметром частиц 50–100 мкм	<ul style="list-style-type: none"> • большой выбор материалов; • возможно создание сложных моделей 	<ul style="list-style-type: none"> • требуются мощный лазер и герметичная камера; • необходимо время для прогрева порошка; • требуется финишная обработка 	Цена на установки может достигать миллионов долларов

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Изм. №

Подп. и дата

Изм. №

Подп. и дата

Изм. №

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Выборочная лазерная печать (SLM)	порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструменталь ную сталь, кобальт- хромовые сплавы, титан, алюминий, золото.	<ul style="list-style-type: none"> • позволяет создавать детали самой замысловатой формы, часто со стенками минимальной толщины и с множеством полостей; • в рамках одной модели допускается комбинирование пористых и монолитных сплавов; • на ее основе производится высокопрочные цельные детали, которые невозможно сделать обычным способом; • последующая доработка изделий не нужна; • по своей специфике — абсолютно безотходный процесс. 	<ul style="list-style-type: none"> • элементы выплавленные из никеля, намного слабее в плане плотности деталей, которые произведены цельным литьем с классической сваркой частей. 	Принтер – от 450 до 650 тыс. евро.
Метод многослойного моделирования (MultiJet Modeling, MJM)	пластики, фотополимеры специальный воск, а также материалы для медицинских имплантов, зубных слепков и протезов	<ul style="list-style-type: none"> • возможно получение малой толщины слоя; • допускаются многоцветная печать и сочетание материалов с разными свойствами; • компактные принтеры 	<ul style="list-style-type: none"> • требуются поддержки; • узкий выбор материалов 	Принтер – около \$50 000; воск для моделей 3Z LabCast — \$260–270 за 360 г; воск для поддержек \$200–210 за 230 г

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Взм. инв.	Взм. инв.	Взм. инв.	Взм. инв.	Взм. инв.

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист

22

Изм. № докум. Подп. Дат

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p><i>Послойное склеивание пленок (Laminated Object Manufacturing, LOM)</i></p>	<p>пластик, бумага, керамика или металл</p>	<ul style="list-style-type: none"> • позволяет использовать <u>полноцветную</u> печать с высоким разрешением; • дешевый и доступный главный расходный материал — бумага; • возможность создания больших моделей; • поддерживающие структуры не требуются 	<ul style="list-style-type: none"> • узкий выбор материалов; • большая количества отходов; • обязательная финишная обработка 	<p>Принтер – от \$47 600 (на российском рынке – от двух миллионов рублей); клей для соединения слоев – около \$70 за 600 мл; картриджи – около \$700 за набор из 4 картриджей по 320 мл или \$195 за каждый картридж по отдельности</p>
<p><i>3D Printing (3DP, 3D-печать)</i></p>	<p>порошок (гипсовый композит)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • возможно создание сложных моделей без поддержек; • позволяет использовать <u>полноцветную</u> печать с высоким разрешением 	<ul style="list-style-type: none"> • узкий выбор материалов; • необходима финишная обработка; • низкая прочность 	<p>Принтер – цена в России свыше 700 тысяч рублей; ведро порошка весом 8 килограмм стоит около \$1000, набор 2×1 л связующей жидкости \$600</p>

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Окончание таблицы 2

<p><i>Послойное наплавление</i> (<i>Fusing Deposition Modeling, FDM</i>)</p>	<p>различные пластики, олово, сплавы металлов с невысокой температурой плавления и даже шоколад</p>	<ul style="list-style-type: none"> • цена; • проект RepRap; • можно получать различные, очень яркие цвета 	<ul style="list-style-type: none"> • невысокая скорость; • небольшая разрешающая способность; • проблемы с фиксацией модели на рабочем столе; • требуется создание поддерживающих структур 	<p>Принтер – от 300долларов до \$1500; килограмм пластиковой – нити десятки евро</p>
--	---	---	--	--

Проанализировав достоинства и недостатки всех методов 3D печати, а так же изучив работы А. А. Высоцкого [6] и Т.Н. Шипициной [37], для своей разработки выберем выборочную лазерную плавку (SLM).

Основным поставщиком оборудования SLM является компания Renishaw (Великобритания). Выберем Renishaw AM250 – усовершенствованный вариант промышленной установки для аддитивного производства методом выборочной лазерной плавки (SLM) AM125. Устройство имеет рабочую камеру увеличенного размера, позволяющую создавать изделия размером 250x250x250мм при минимальной толщине наносимого слоя в 20 мкм. В качестве расходных материалов используются различные металлы и сплавы, включая алюминий, сталь, кобальт-хромовый сплав и др. Печать производится в рабочей камере, наполненной инертным газом, что позволяет использовать реактивные материалы. Устройство оснащено Ethernet интерфейсом для подключения к локальной сети [50].

Изн. №	Подп. и дата	Изн. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
Изн. №	Подп. и дата	Изн. №	Взам. инв.	Подп. и дата		24
Изн. №	Подп. и дата	Изн. №	Взам. инв.	Подп. и дата		
		Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

Таблица 3 – Renishaw AM250

Назначение	Промышленный
Страна	Великобритания
Производитель	<u>Renishawplc</u>
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Технология печати	Выборочная лазерная плавка (SLM)
Область построения, мм	250x250x300
Толщина слоя (мм)	0,02
Скорость печати	5-20 см ³ /час
Интерфейсы	<u>Ethernet</u>
Дисплей	Да
Скорость сканирования	2000 мм/с
Мощность/тип лазера:	200 или 400 Вт
РАСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Типы материалов	Металл
Материалы:	Нержавеющая сталь, Инструментальная сталь, Алюминиевые сплавы, Чистый титан, Титановый сплав, <u>Кобальт-хромовые сплавы, инконель</u>
ГАБАРИТЫ	
Размеры (мм)	1700x800x2025
Вес (кг)	1100

Также необходимо выбрать материал, с помощью которого мы будем изготавливать корпус датчика и мембрану. Для этого сравним механические характеристики материалов для выборочной лазерной плавки [31] с

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Подп. и дата	Взам. инв.	Подп. и дата	Изн. №

12.04.01.2018.525 ПЗ

механическими характеристиками материала – нержавеющей сталь AISI 316 (07X18H13M2), из которого изготавливаются корпус и мембрана датчика давления обычными методами, и представим в виде таблицы (Таблица 4).

Таблица 4 – Механические характеристики материалов [22, 24]

	Титан TiAl6V4	Сталь 1.4404 (316L)	Никель <u>Inconel 625</u>	Нержавеющая сталь AISI 316 (07X18H13M2)
1	2	3	4	5
Предел прочности (МПа)	1286+/-57	654+/-49	961+/-41	515-580
Смещение текучности (МПа)	1116+/-61	550+/-39	707+/-41	205-310
Деформация при разрушении (%)	8+/-2	35+/-4	33+/-2	40-55
Модуль Юнга (ГПа)	114+/-4	169+/-31	182+/-9	200
Твердость по <u>Виккерсу (HV10)</u>	384+/-5	233+/-2	285+/-3	164

Ближе всего к нержавеющей стали по механическим характеристикам Сталь 1.4404 (316L). Из нее и будем изготавливать корпус и мембрану нашего датчика.

В.А. Овчинников, Р.Г. Ахметшин и др. проводили исследовательские работы по сплавлению порошков на лазерном 3D принтере, разработанном и изготовленном в Томском политехническом университете. По результатам работы показано, что к порошкам металлов должны предъявляться высокие требования по дисперсности и соотношению характерных размеров. [27].

Подп. и дата

Взам. инв.

Инв. №

Подп. и дата

Инв. №

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист

26

Изм. № докум. Подп. Дат

В данном разделе представлен обзор датчиков давления и методов 3D печати. Также мы выбрали метод и материал для разработки корпуса и мембраны датчика давления с емкостной ячейкой.

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата		27
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата		
		Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО СВОЙСТВ

Методика изготовления датчика:

1. Создание 3D модели датчика давления в программе SolidWorks.
2. Конвертирование файла модели в STL-файл с учетом особенностей печати деталей.
3. Разделение каждой детали на слои толщиной определяемой точностными требованиями к датчику давления и толщиной слоя, реализуемой на 3D принтере.
4. Требования к технологическому процессу сборки датчика давления.

2.1 Создание 3D модели датчика давления в программе SolidWorks

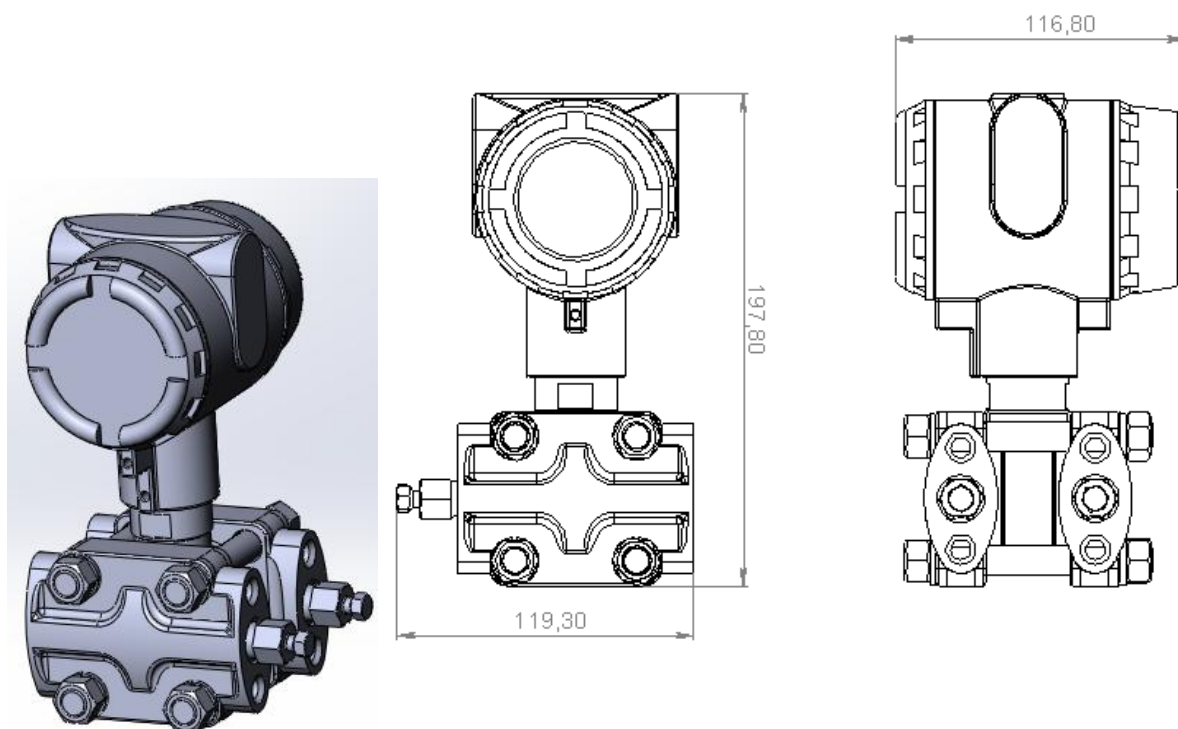


Рисунок 2 – Модель датчика давления с емкостной ячейкой

Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №
Подп. и дата	Взам. инв.	Инд. №	Подп. и дата	Инд. №

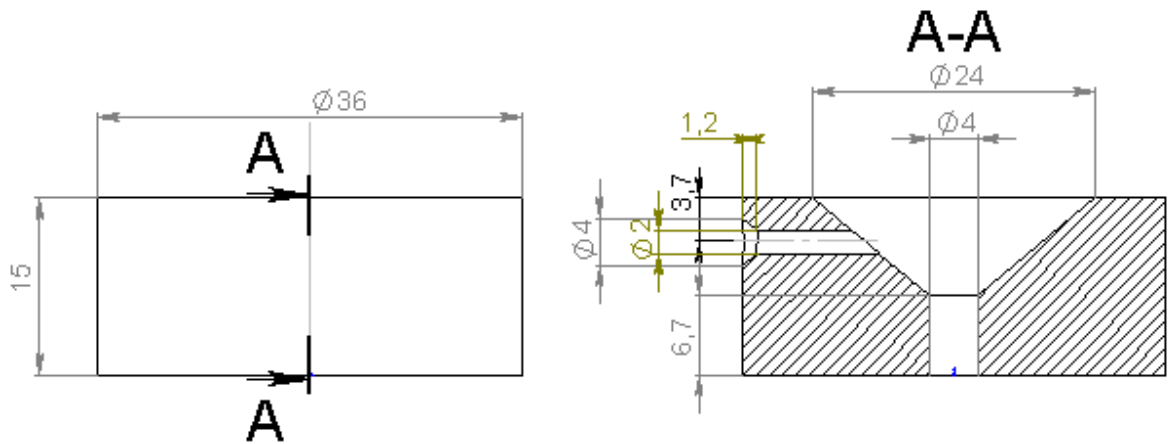
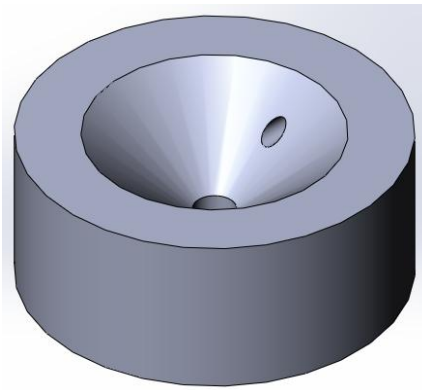


Рисунок 3 – Модель корпуса сенсора

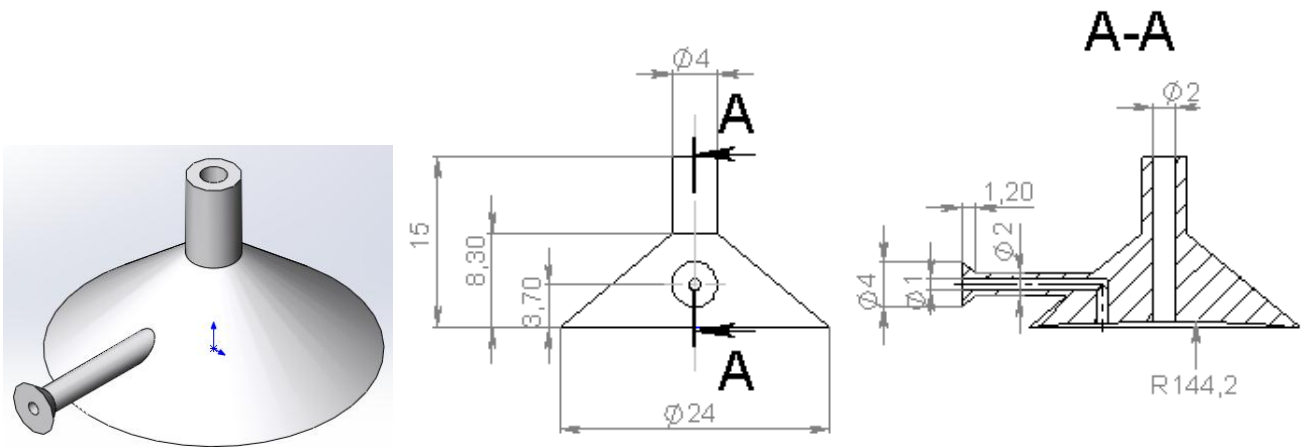


Рисунок 4 – Модель диэлектрической оболочки

Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

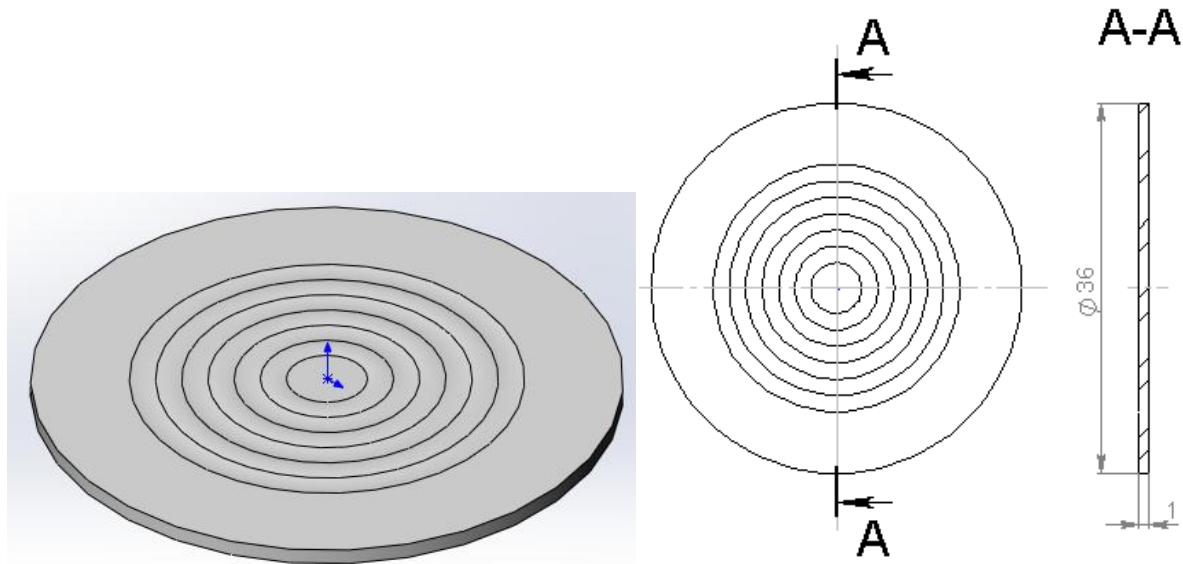


Рисунок 5 – Модель мембраны

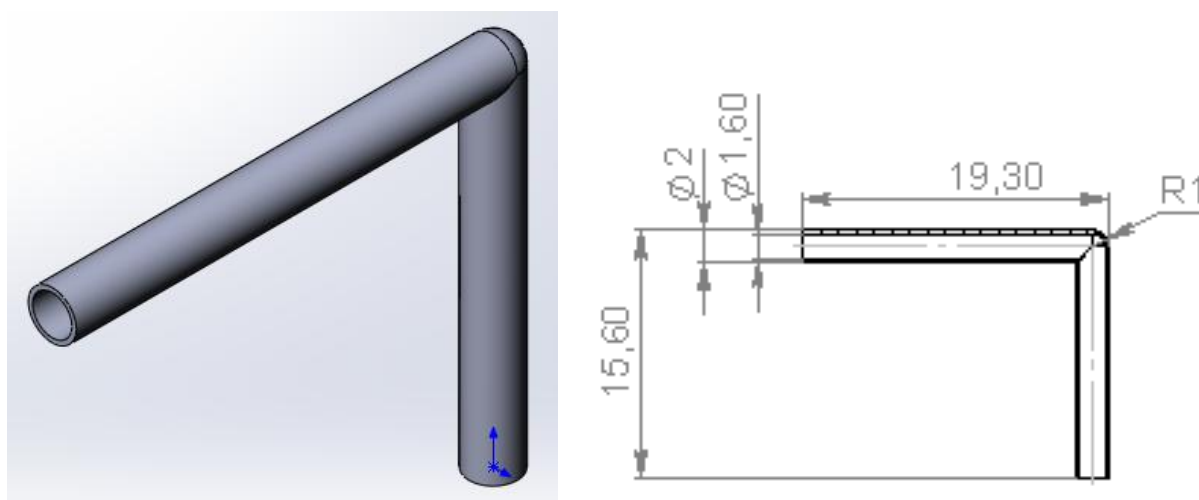


Рисунок 6 – Модель масляной трубки

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

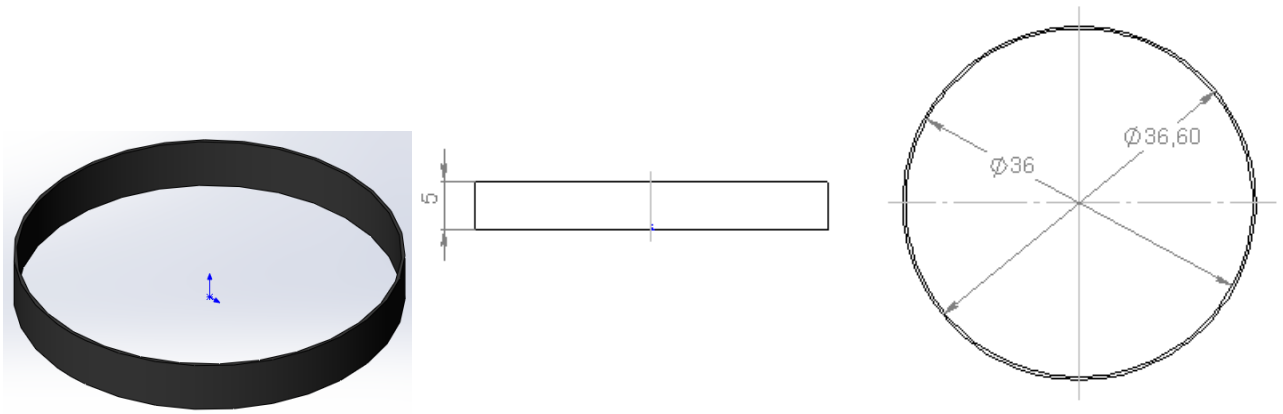


Рисунок 7 – Модель уплотнительного кольца

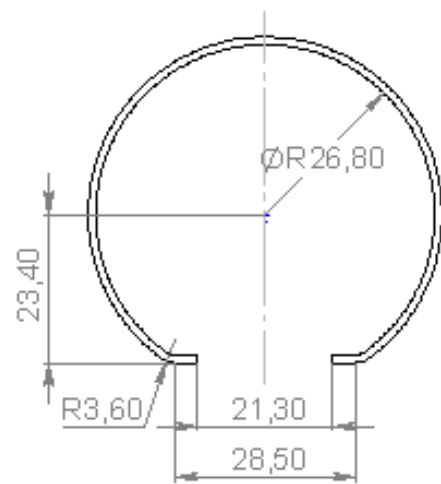
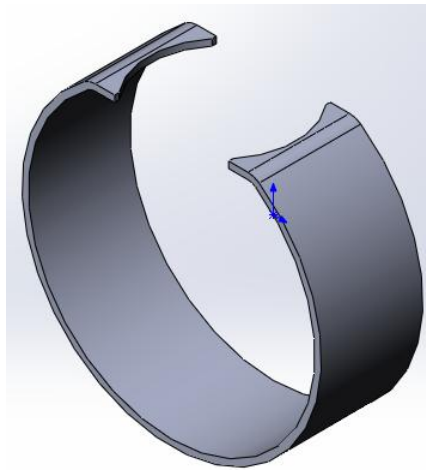
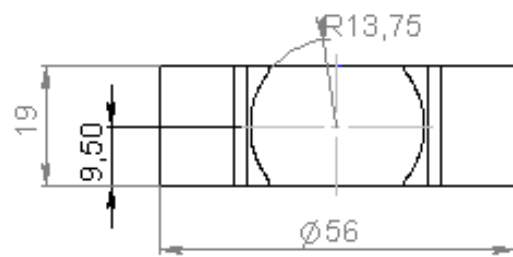
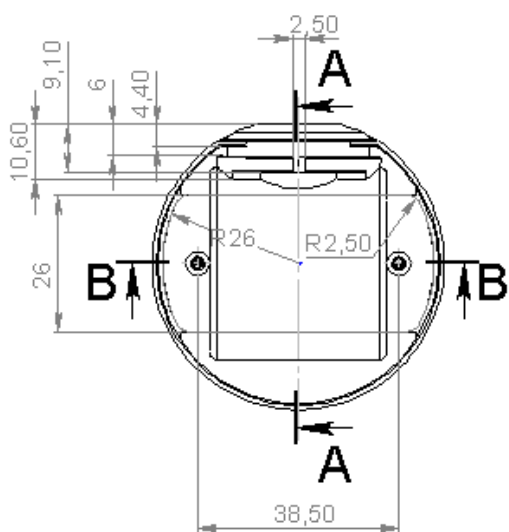
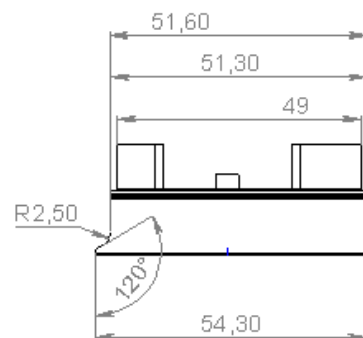
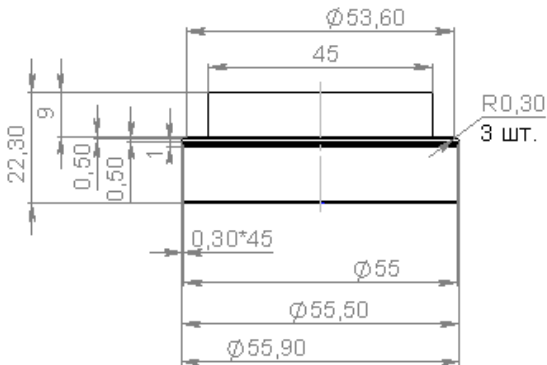
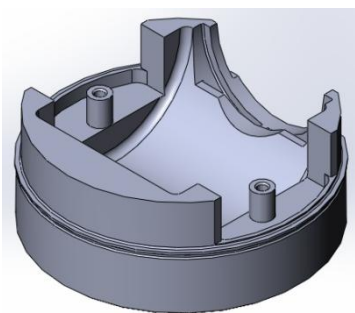


Рисунок 8 – Модель обоймы

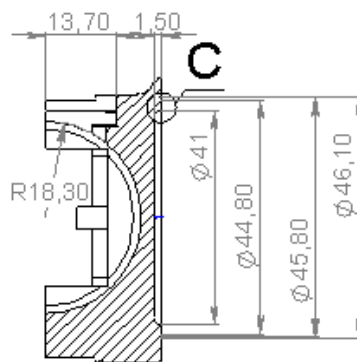
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
------	----------	-------	-----

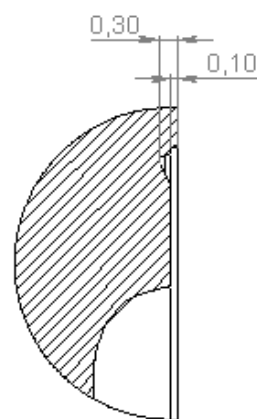
12.04.01.2018.525 ПЗ



A-A



C (10 : 1)



B-B

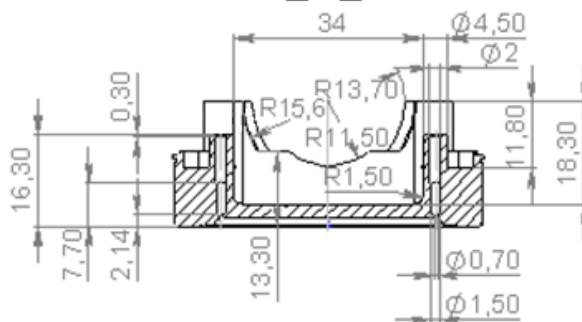


Рисунок 9 – Модель корпуса емкостной ячейки

Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата

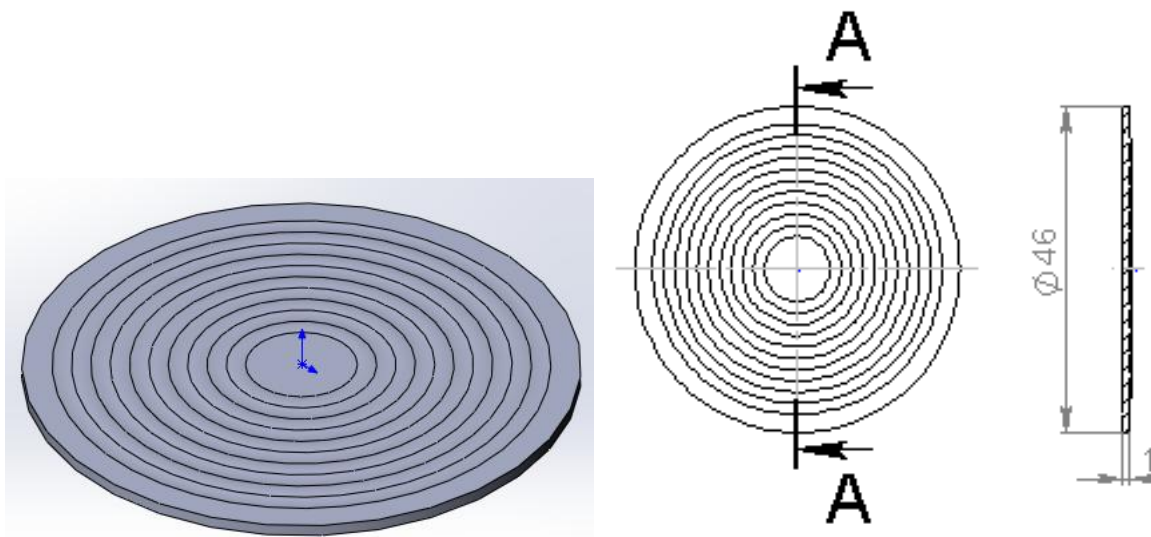


Рисунок 10 – Модель разделительной мембраны

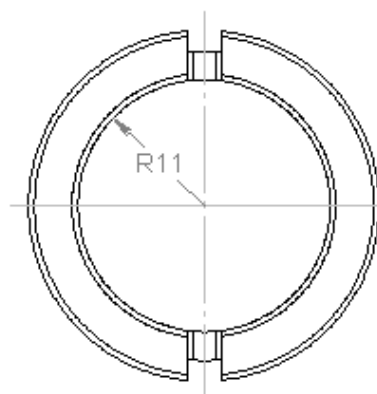
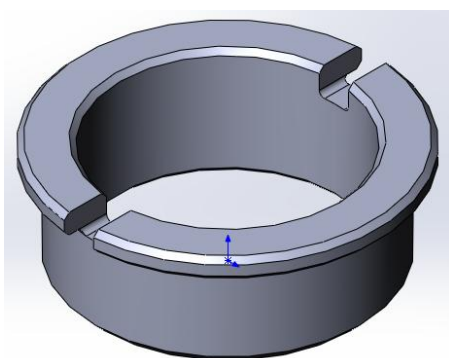
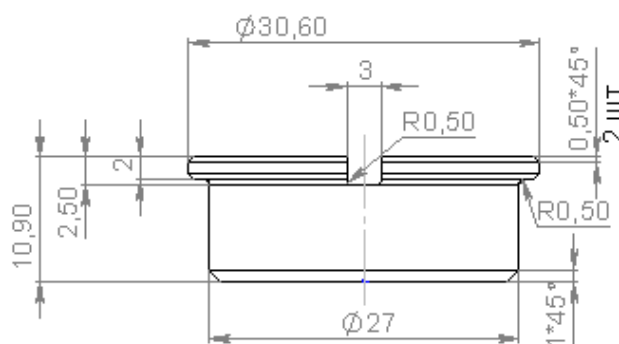


Рисунок 11 – Модель втулки

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата	Взам. инв.	Подп. и дата

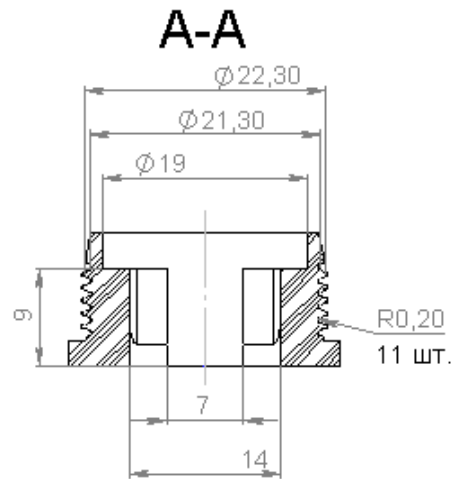
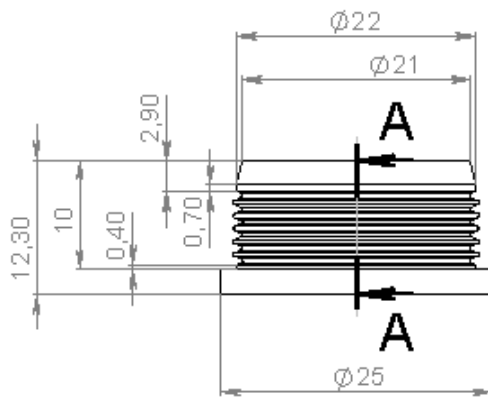
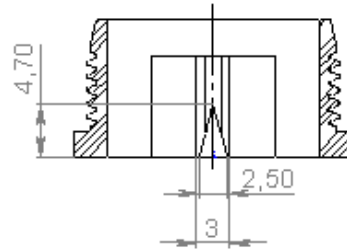
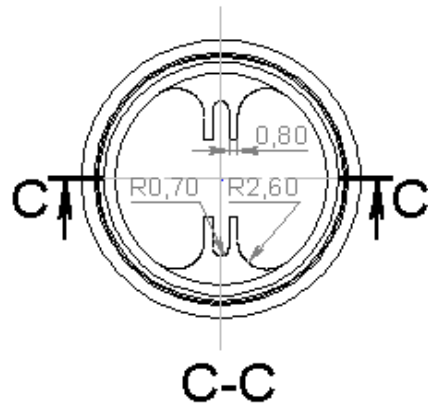
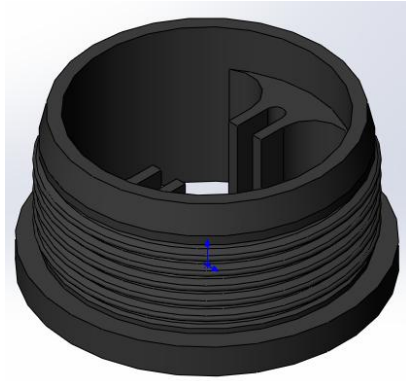


Рисунок 12 – Модель фиксатора

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

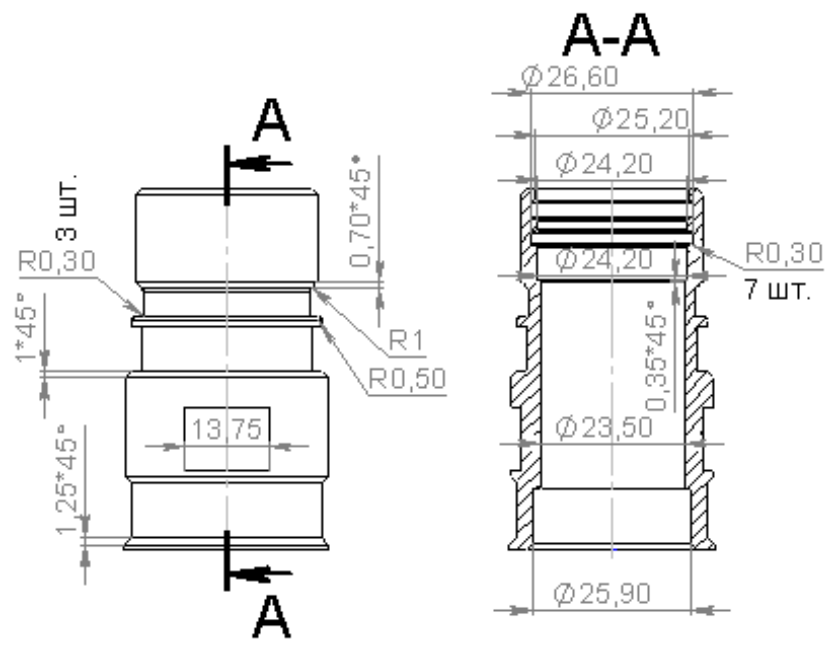
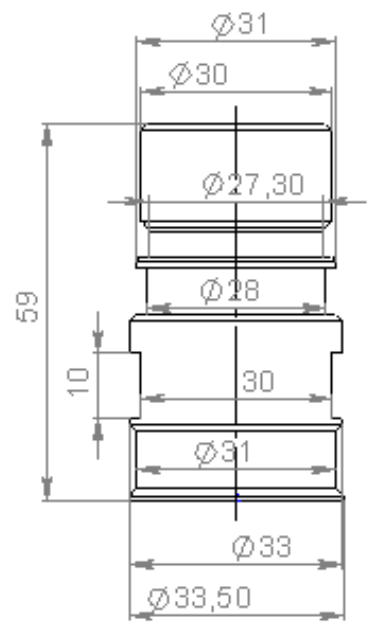
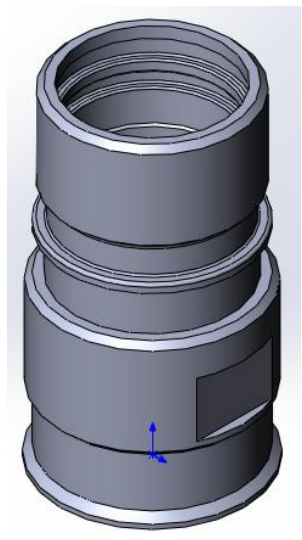


Рисунок 13 – Модель штуцера

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
------	----------	-------	-----

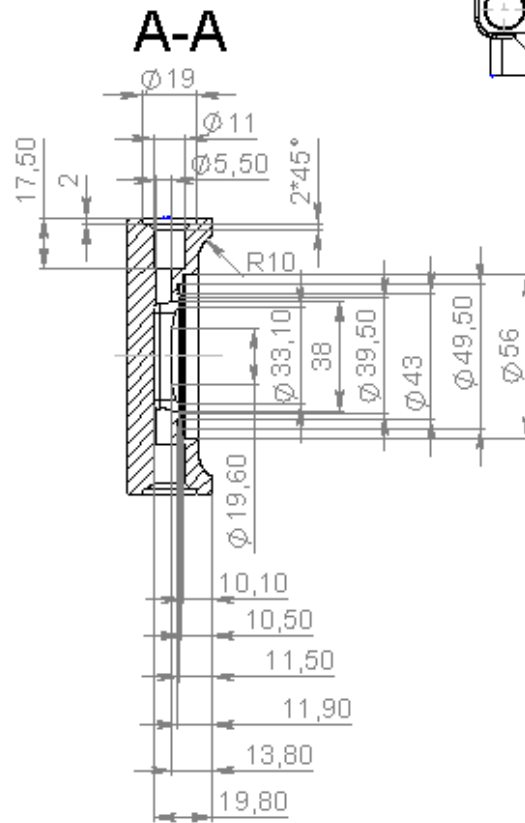
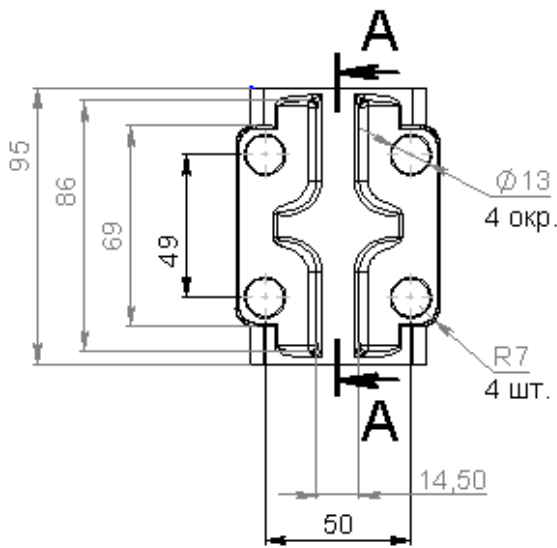
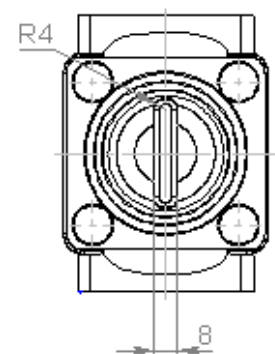
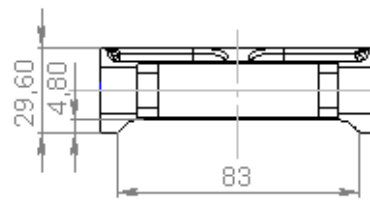
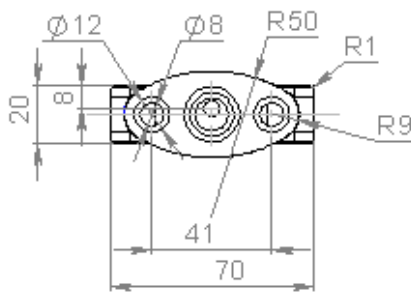
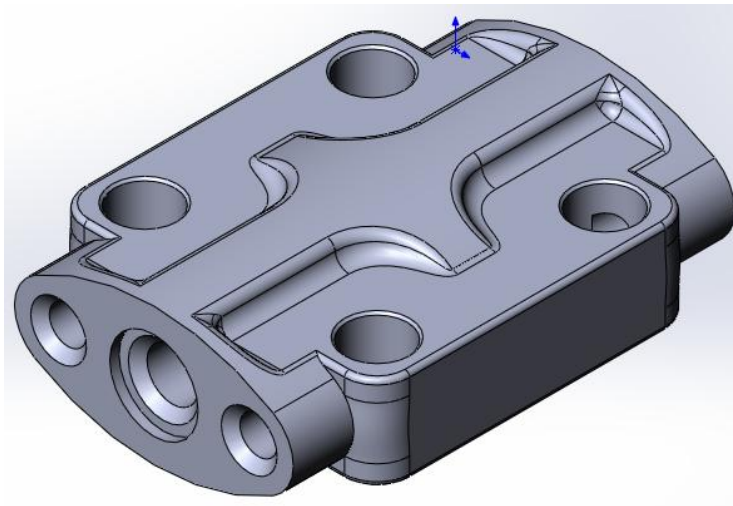


Рисунок 14 – Модель фланца

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист
36

Изм. № докум. Подп. Дат

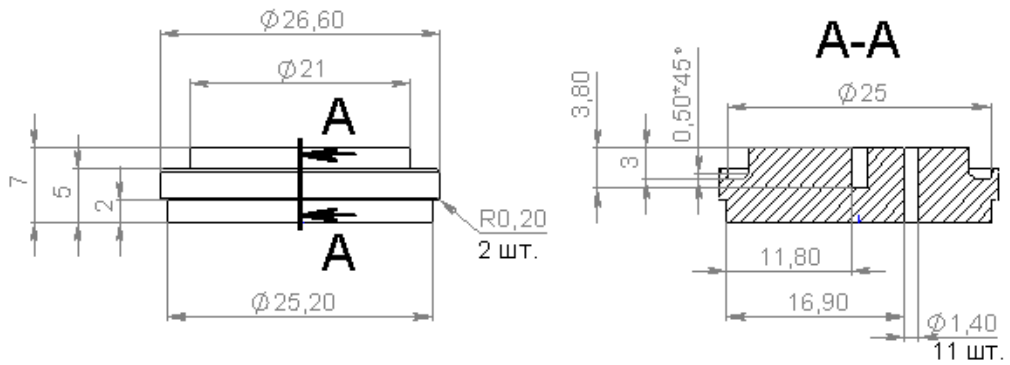
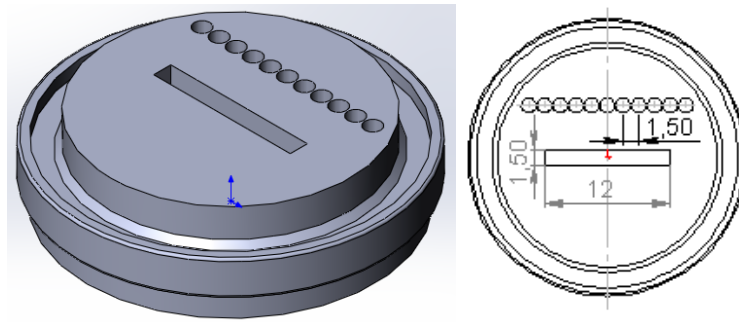


Рисунок 15 – Модель заглушки штуцера

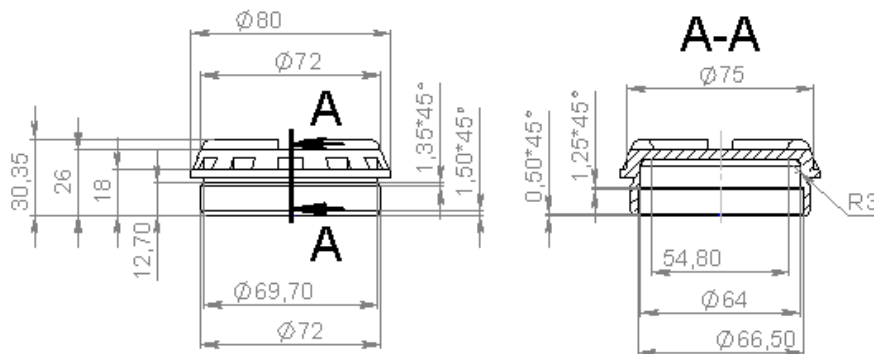
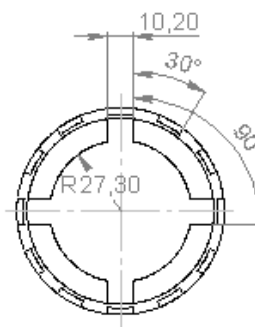
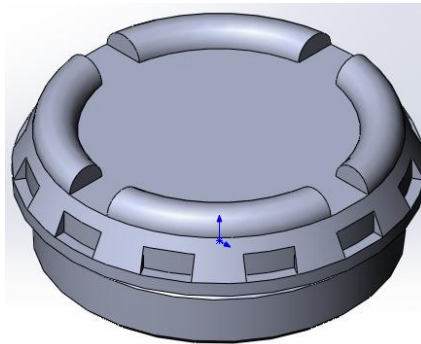
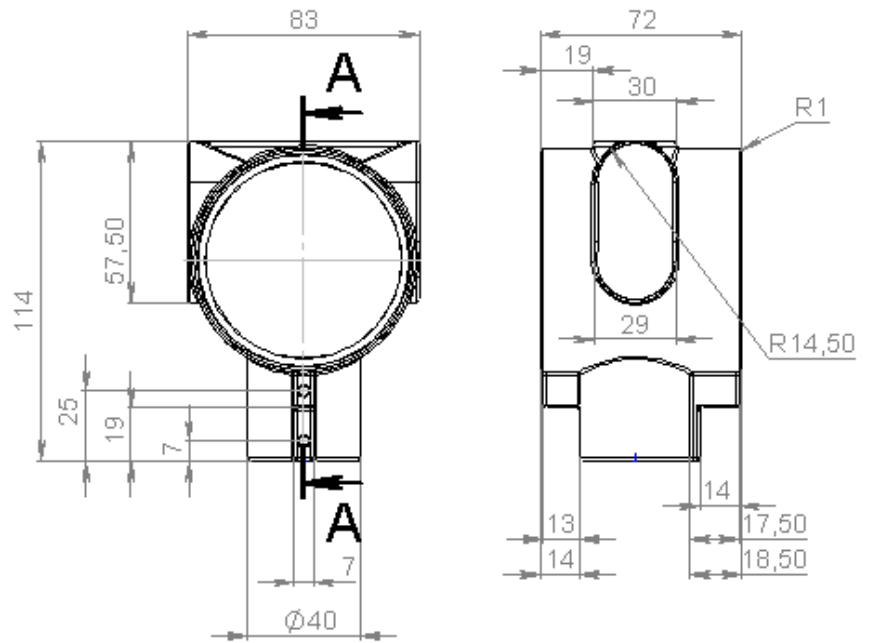
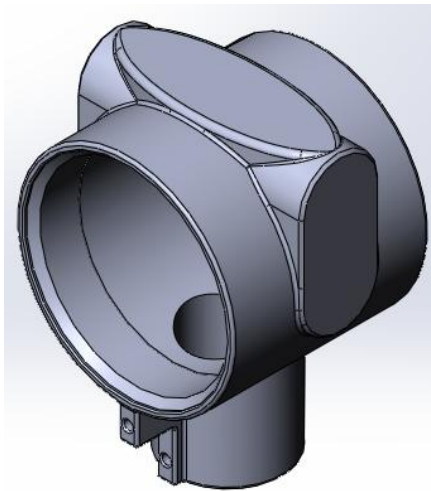


Рисунок 16 – Модель крышки 1 корпуса

Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Взам. инв.
Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата



A-A

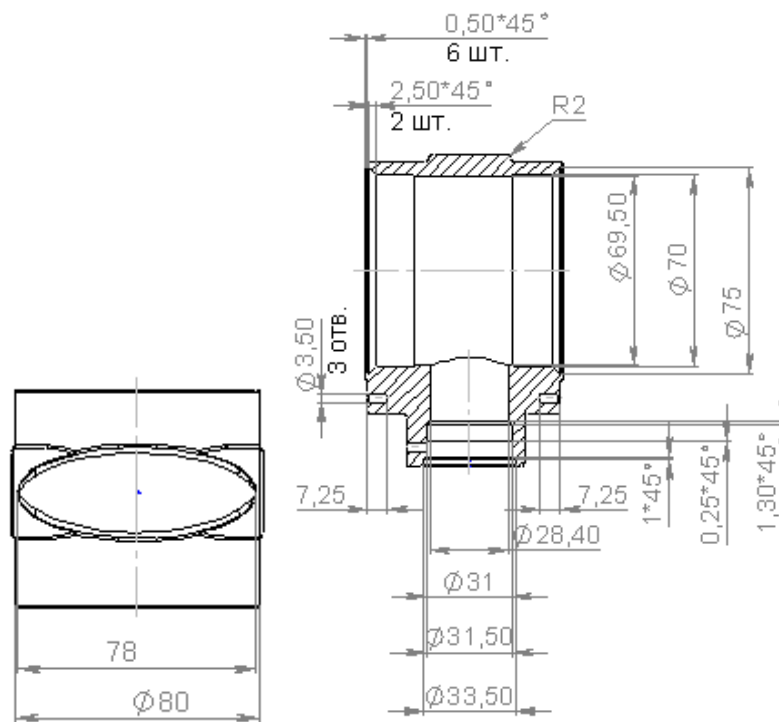


Рисунок 17 – Модель корпуса

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист

38

Изм. № докум. Подп. Дат

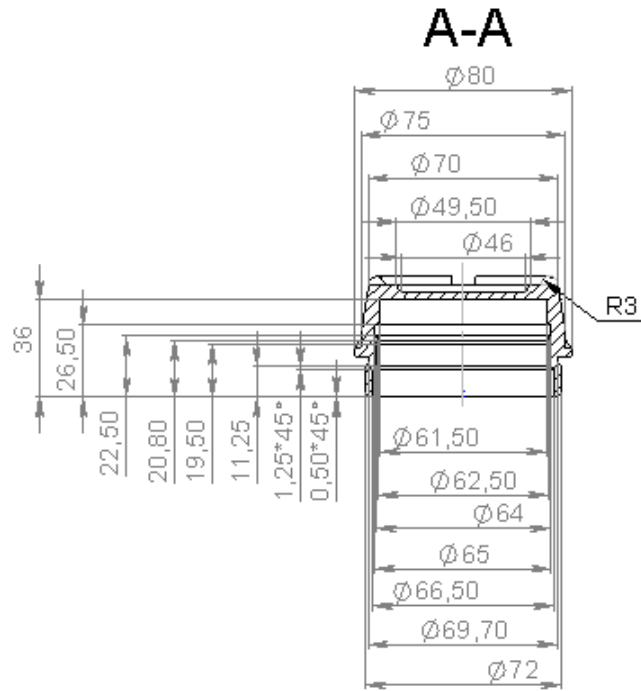
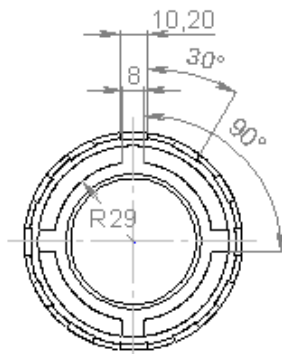
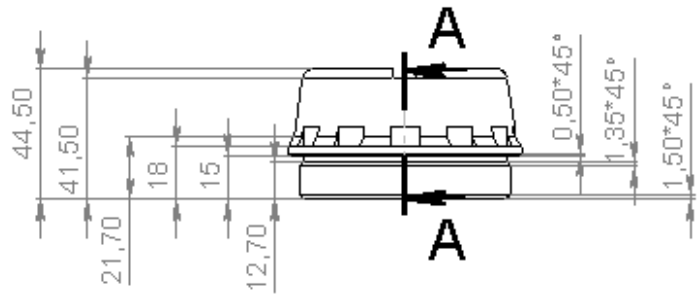
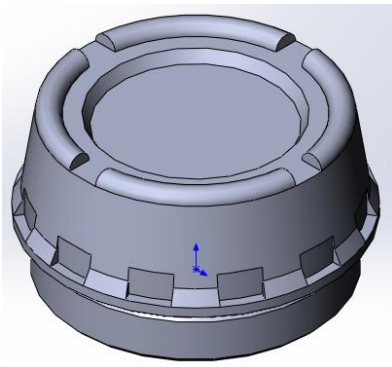


Рисунок 18 - Модель крышки 2 корпуса

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

12.04.01.2018.525 ПЗ

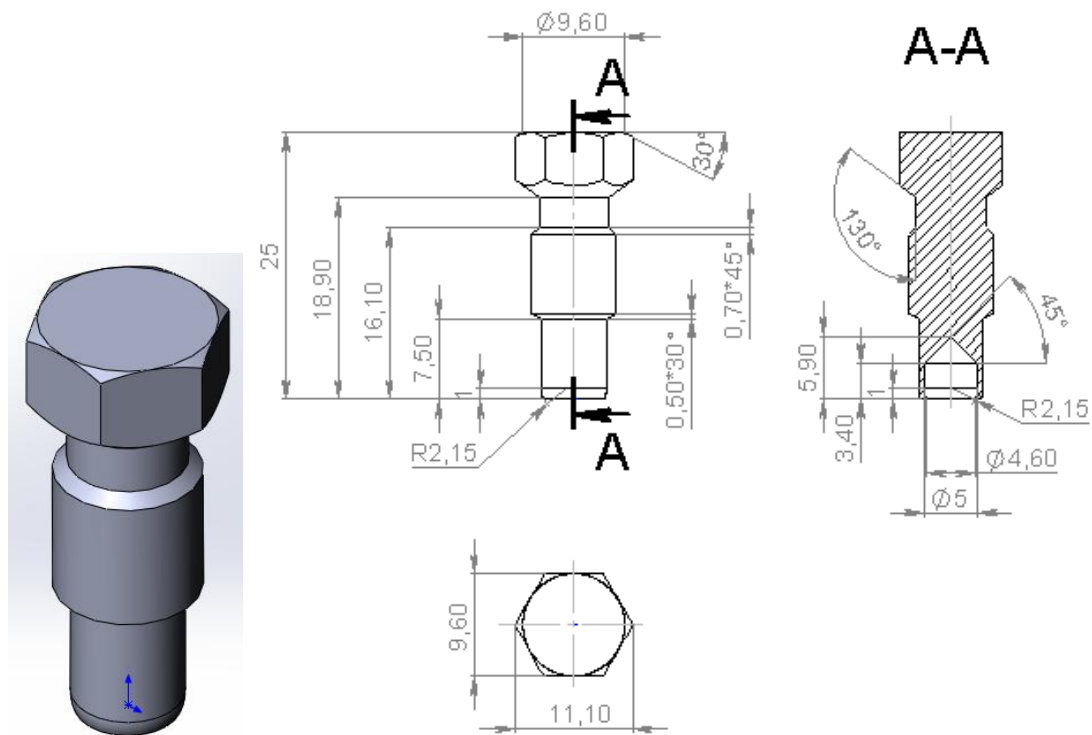
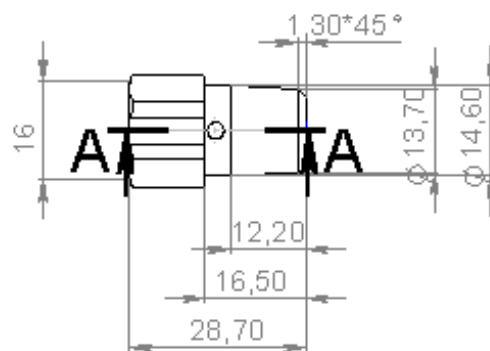
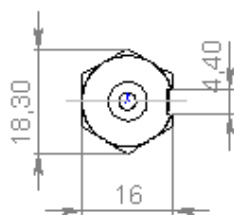
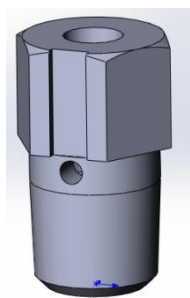


Рисунок 19 – Модель штока клапана



A-A (1 : 1)

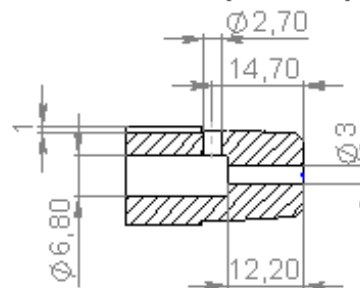


Рисунок 20 – Модель посадки клапана

Инт. №	Инт. №	Инт. №	Инт. №	Инт. №
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

2.2 Конвертирование файла модели в STL-файл с учетом особенностей печати деталей

Согласно ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения [11]:

Формат файлов аддитивного производства; ФФАЛ (Additive Manufacturing File Format. AMF) – формат файлов для коммуникационной (для обмена данными) электронной геометрической модели аддитивного производства, включающей в себя пространственное описание геометрии поверхности, со встроенной поддержкой для цвета, материалов, сеток координат, групп элементов и метаданных.

STL – формат данных модели, описывающий геометрию поверхности объекта как мозаику из треугольников. Используется для передачи геометрических моделей на установки для изготовления деталей.

Формат файла STL использует серию связанных треугольников для воссоздания геометрии поверхности твердой модели. При увеличении разрешения будет использоваться больше треугольников, лучше аппроксимирующих поверхности 3D-модели, но также увеличивающих размер файла STL.

Если экспортировать файл в слишком маленьком разрешении, модель будет иметь видимые треугольники на своей поверхности при печати. В большинстве случаев это нежелательно, но их можно использовать для создания «низкополигональных» моделей с цифровым внешним видом.

Увеличение разрешения выше определенной точки также не рекомендуется, так как оно не приносит никакой дополнительной пользы: очень мелкие детали не могут быть напечатаны в формате 3D, поэтому размер файла будет излишне увеличен, что затруднит последующую обработку.

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Взам. инв.	Подп. и дата
--------	--------	--------	------------	--------------

Можно изменить разрешение файлов STL, изменив параметры формата в программном обеспечении.

Каждый пакет CAD имеет разные варианты разрешения STL, но большинство использует два основных параметра: высоту хорды и угол.

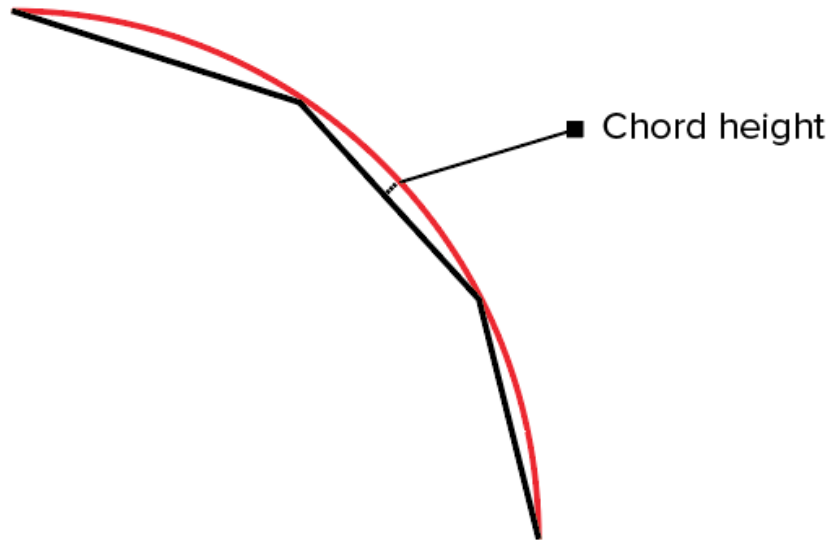


Рисунок 21 – Высота хорды

Высота хорды (Рисунок 21) — это максимальное расстояние между поверхностью исходной 3D модели и поверхностью файла STL, которое позволяет использовать программное обеспечение. Использование меньшей высоты хорды поможет более точно показать кривизну поверхности.

Рекомендуемое значение для высоты хорды составляет $1/20$ от толщины слоя 3D печати и не ниже 0,001 мм (1 микрон). Это всегда приведет к созданию файла STL с идеальной точностью для большинства приложений 3D печати. Экспортирование с меньшим допуском не повлияет на качество печати, так как большинство обычных 3D принтеров не способны воспроизвести такой высокий уровень детализации.

Инт. №	Подп. и дата	Инт. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист 42
Инт. №	Подп. и дата	Инт. №	Взам. инв.	Подп. и дата		
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат			

$\alpha = 15$ degree angle
by default

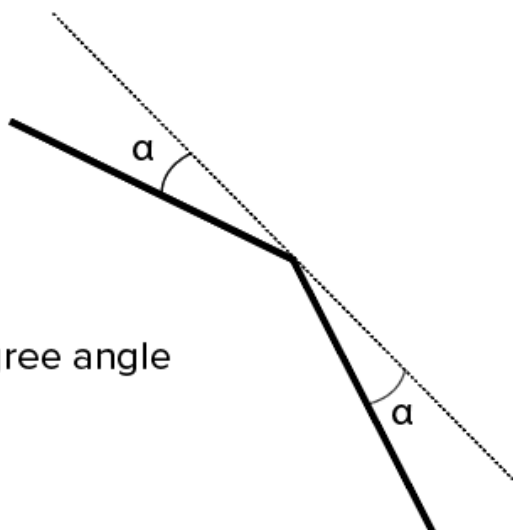


Рисунок 22 – Угловой допуск

Угловой допуск (Рисунок 22) ограничивает угол между нормальными соседних треугольников. Значение по умолчанию часто составляет 15 градусов. Некоторые программы также задают этот допуск как значение от 0 до 1. Если для более гладкой поверхности не требуется более высокая настройка, рекомендуется значение по умолчанию 15 градусов (или 0).

Экспорт файлов STL из Solidworks:

1. Открыть вкладки File > Save As....
2. Установить тип файла STL (*.stl).
3. Открыть вкладку Options.
4. Установить исходящий формат файла Binary.
5. Единицы измерения – миллиметры или дюймы (Unit: >Millimeters or Inches).
6. Разрешение-Хорошее (Resolution>Fine).
7. Нажать ОК.
8. Ввести имя файла.
9. Сохранить [49].

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

2.3 Разделение каждой детали на слои толщиной определяемой точностными требованиями к датчику давления и толщиной слоя, реализуемой на 3D принтере

Чтобы превратить STL-файл в G-код (язык, который понимает 3D принтер), требуется программа-слайсер. Слайсером она называется потому, что нарезает (toslice – англ.) 3D модель на множество плоских двумерных слоев, из которых 3D принтер будет складывать физический объект.

Для работы была выбрана программа NetfabbBasic [30], т.к. это слайсер для 3D печати с особенностями, которые позволяют анализировать, «чинить» и редактировать STL-файлы до перехода на этап нарезки модели.

Возможно быстро исправлять STL-файлы, не изучая таких программ, как MeshLab или Meshmixer.

NetfabbBasic —мощный инструмент для 3D-печати.

Цена: Бесплатно.

Системы: PC, Mac, Linux.

На рисунке 23 представлена мембрана в программе NetfabbBasic.

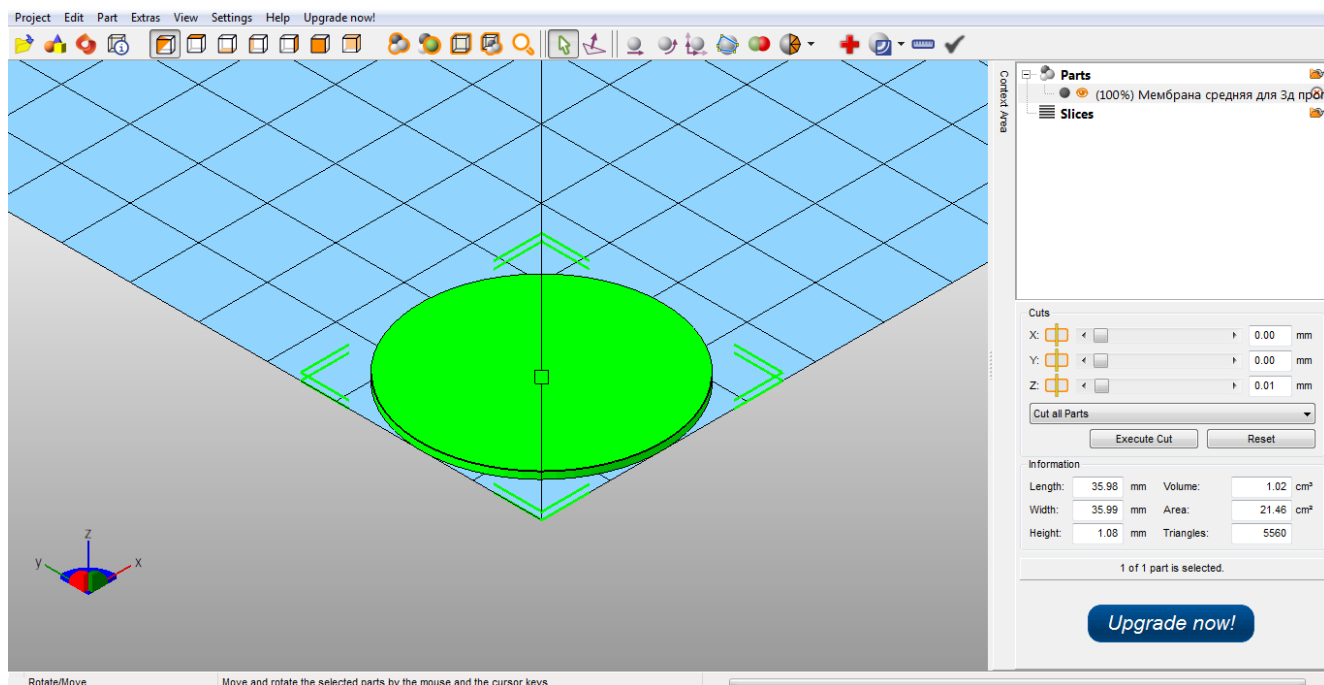


Рисунок 23 – Мембрана в программе NetfabbBasic

Изм. № Подп. и дата
Изм. № Подп. и дата
Изм. № Подп. и дата
Изм. № Подп. и дата

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
------	----------	-------	-----

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист
44

NetfabbBasic отображает данные о модели: объем модели в кубических сантиметрах (Volume), длину (Length), ширину (Width) и высоту (Height) модели по ее максимальным размерам, как если бы модель была помещена в куб (габаритный контейнер).

На рисунках 24-26 представлен процесс «нарезки» модели. NetfabbBasic запрашивает толщину слоя (Рисунок 24). Для выбранного принтера, она составляет 20 мкм.

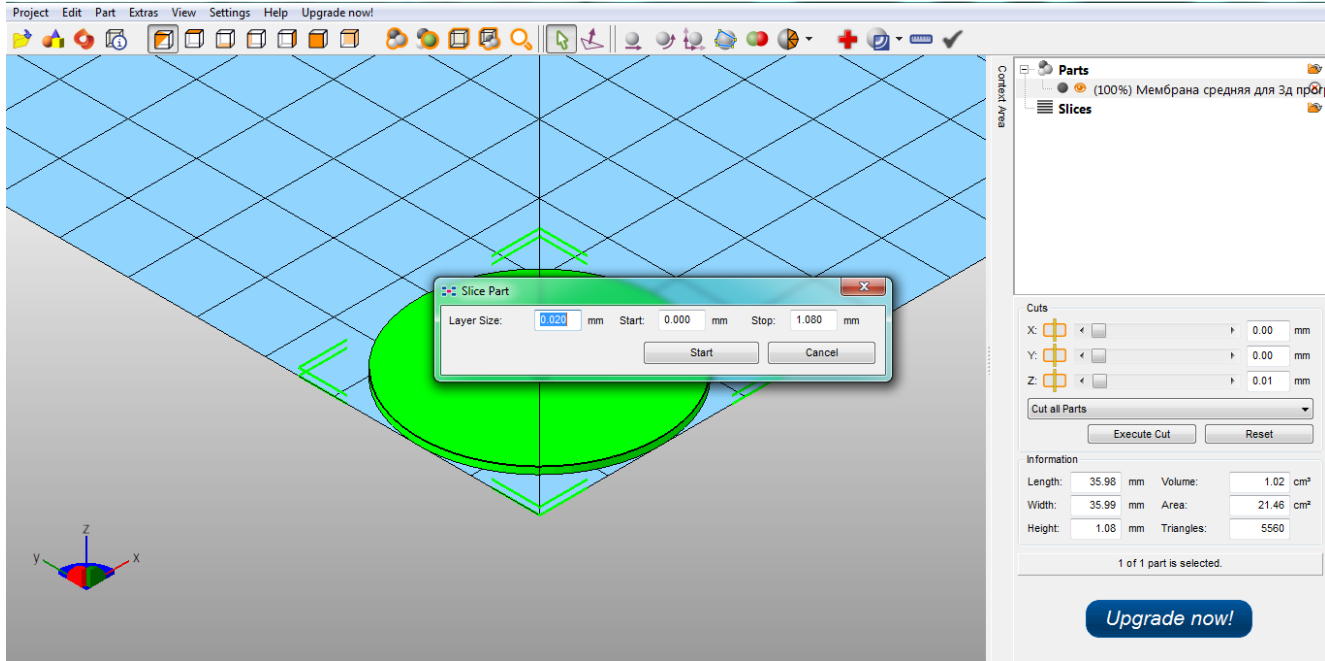


Рисунок 24 – Ввод толщины слоя печати

NetfabbBasic разделила модель на 55 слоев, можно запустить анимацию и посмотреть, как будет выглядеть каждый слой на плоскости. Например, 15 будет выглядеть, как окружность (Рисунок 25), а 54, как несколько окружностей (Рисунок 26).

Инь. №	Подп. и дата
Инь. №	Взам. инв.
Инь. №	Подп. и дата
Инь. №	Подп. и дата

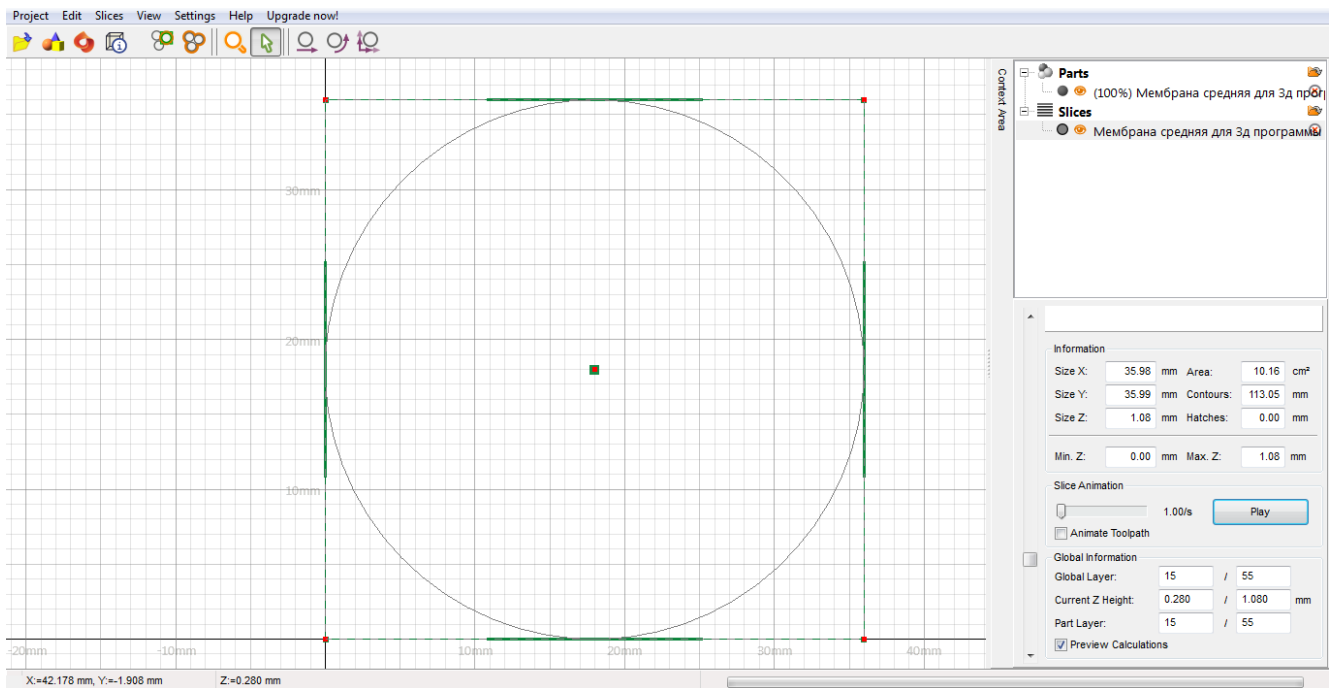


Рисунок 25 – 15 слой модели

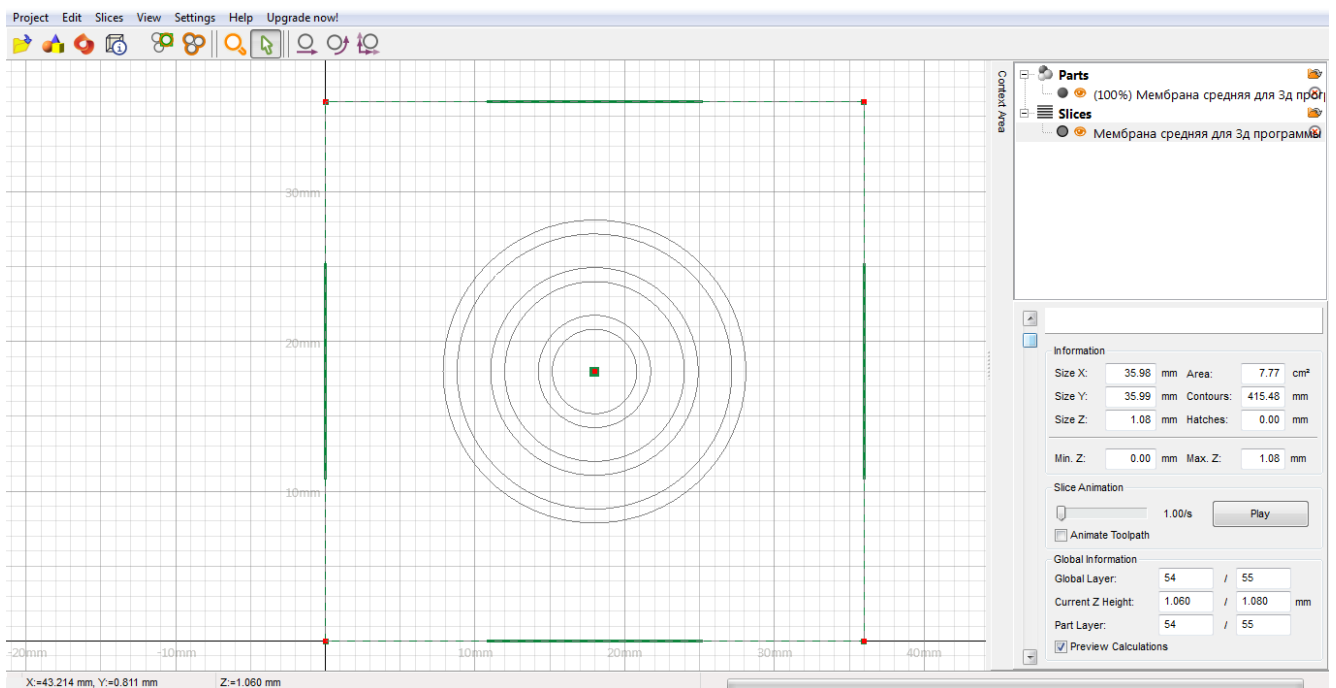


Рисунок 26 – 54 слой модели

Для того чтобы можно было распечатать 3D-модель, она должна быть «watertightness» (т.е. цельной, образующей замкнутый объём). Самые распространённые ошибки при моделировании в SolidWorks:

Инв. № _____ Подп. и дата _____
 Инв. № _____ Подп. и дата _____
 Инв. № _____ Подп. и дата _____
 Инв. № _____ Подп. и дата _____

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

- Внутренние поверхности
- Дыры

В случае если основание не является плоским, может произойти деламинация, вследствие чего могут сместиться оси координат.

Модель погрешности печати датчика включает в себя:

- Дисперсность порошка [32].
- Минимальная толщина наносимого слоя.
- Ошибки при моделировании.
- Деламинация.
- Мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча и шаг сканирования [23].

Если полученный результат печати не будет удовлетворять точностным требованиям, в этом случае будет необходима постобработка.

Н.П. Алешин, В.В. Мурашов, А.Г. Евгенов и др. рассмотрели дефекты металлических деталей, характерные для технологии селективного лазерного сплавления. Дефекты разбиты на 4 группы по степени их опасности. Приведены количественные и качественные показатели дефектов и указаны причины их образования [2].

Н.П. Алешин, М.В. Григорьев, О.А. Крупнина, Н.А. Щипаков провели оценку результатов томографического контроля модельного образца, изготовленного по технологии селективного лазерного сплавления. Рассмотрели особенности выявления дефектов типа «несплавление» и влияние различных параметров проведения контроля на его результаты [3].

2.4 Требования к технологическому процессу сборки датчика давления

Согласно ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий [10]:

Сборка – образование соединений составных частей изделия.

Инд. №	Инд. №	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата

Согласно ГОСТ 23887-79 Сборка. Термины и определения [9]:

Технологический процесс сборки – технологический процесс, содержащий действия по установке и образованию соединений составных частей заготовки или изделия.

Требования к технологическому процессу сборки датчика давления:

- точность размеров сопрягаемых деталей или сборочных единиц,
- точность взаимного положения сопрягаемых деталей или сборочных единиц при сборке,
- точность форм сопрягаемых поверхностей,
- точность средств технологического оснащения,
- точность шероховатости сопрягаемых поверхностей.

Методика исследования датчика (разделы 3 и 4):

1. Определение зависимости прогиба мембраны от давления в рабочем диапазоне в программе SolidWorks.
2. Расчет зависимости выходного напряжения от давления по электрокинематической схеме датчика давления.
3. Определение диапазона измеряемых давлений по принципиальной схеме датчика давления.

В данном разделе разработаны методика изготовления датчика давления с применением аддитивных технологий и методика исследования его свойств.

Инв. №	Подп. и дата					12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист 48
	Взам. инв.						
	Инв. №						
	Подп. и дата						
	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат			

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.

Для моделирования рабочих процессов изготовления деталей датчика давления методом выборочной лазерной плавки использована программа SolidWorks [46]. Модель процесса селективной лазерной наплавки порошков, учитывающая фазовые переходы плавление-кристаллизация была представлена в работе Гришаева Р.В. [12]. Оценку производительности селективного лазерного плавления дали Т.П. Дворянинова, А.В. Жданов, Л.В. Беляев [17].

Задача моделирования процессов изготовления деталей датчика давления состоит в поиске послойной структуры деталей, которая будет выдерживать максимальное давление.

Из элементарных объемов [39] сформированы три варианта слоя, представленные на рисунке 27. Слой, показанный на рисунке 21 а, выполнен с шагом 0,05 мм без поперечного сдвига точек спекания слоев. Слой, показанный на рисунке 21 б, выполнен с шагом 0,05 мм и поперечным сдвигом точек спекания слоев 0,025 мм. Слой, показанный на рисунке 21 в, выполнен с шагом 0,025 мм без поперечного сдвига точек спекания слоев.

Инв. №	Подп. и дата		Взам. инв.		Подп. и дата		
					12.04.01.2018.525 ПЗ		Лист
							49
		Изм.	№ докум.	Подп.	Дат		

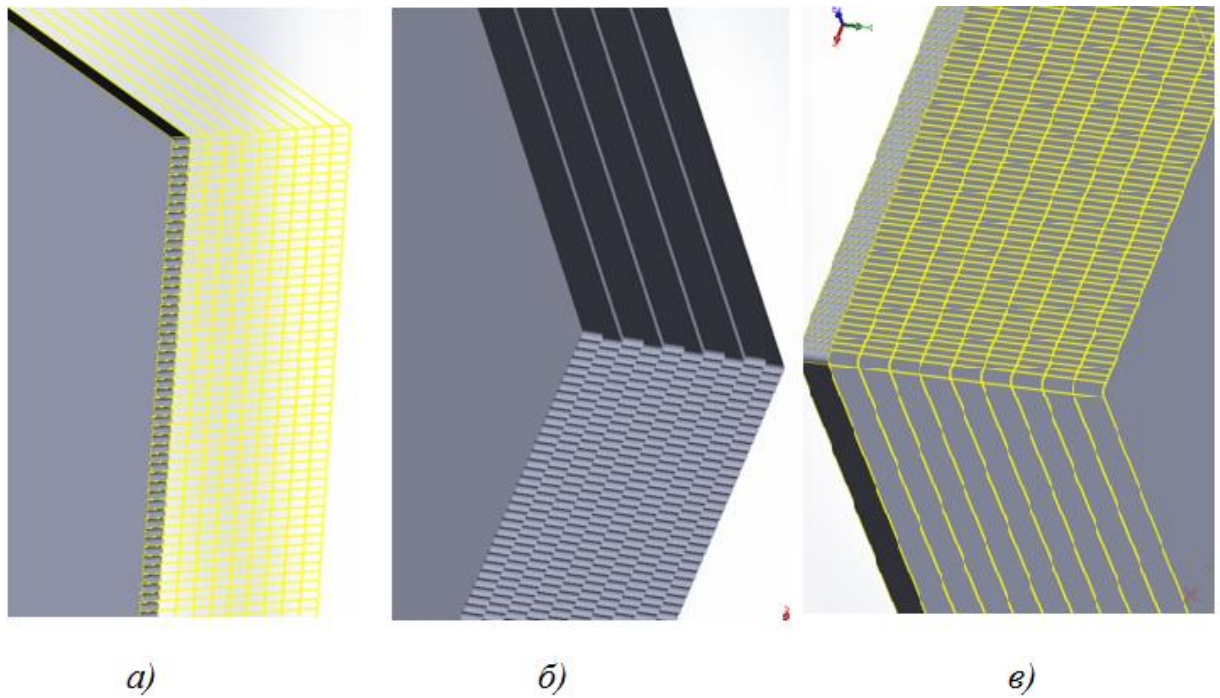


Рисунок 27 – Часть поверхности датчика: а) шаг 0,05 мм, без поперечного сдвига точек спекания слоев; б) шаг 0,05 мм, поперечный сдвиг точек спекания слоев 0,025 мм; в) шаг 0,25 мм, без поперечного сдвига точек спекания слоев

После создания части поверхности необходимо задать параметры моделирования: материал (Рисунок 28), крепление (Рисунок 29), давление (Рисунок 30), сетку (Рисунок 31).

Инв. №	Подп. и дата				
	Взам. инв.				
	Инв. №				
	Подп. и дата				
		12.04.01.2018.525 ПЗ			Лист
					50
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат		

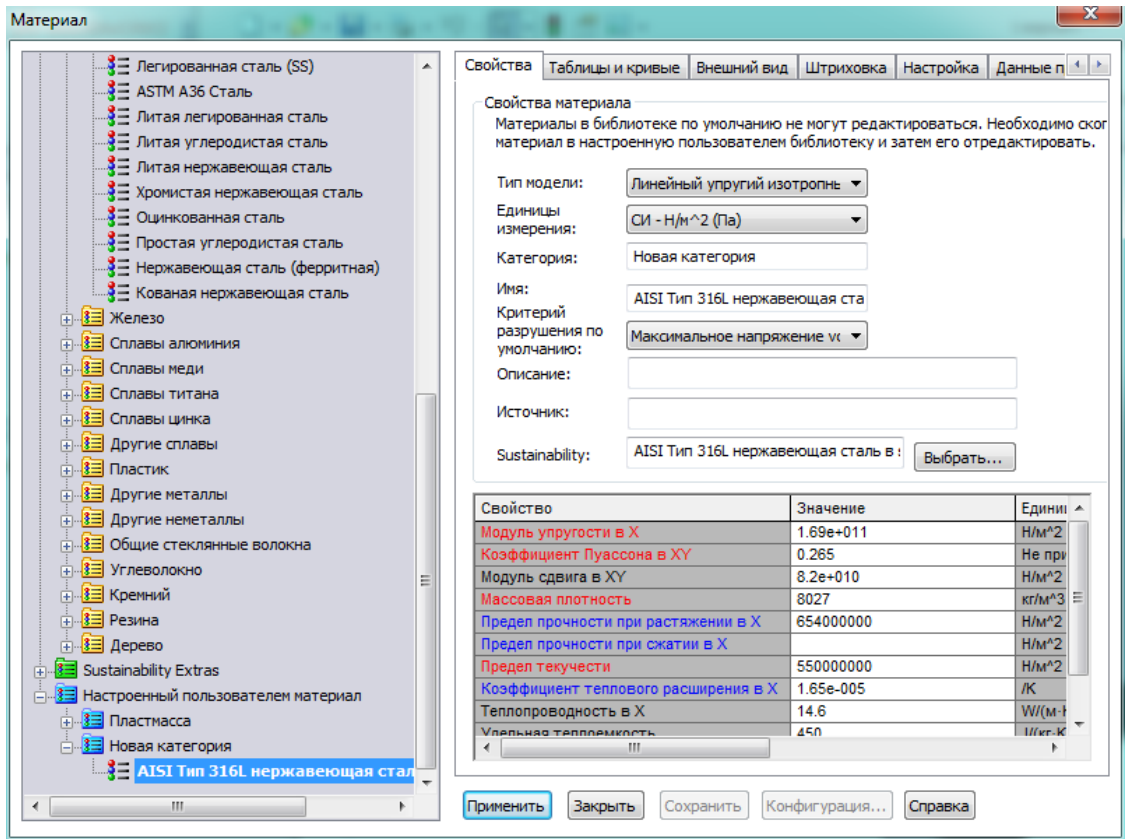


Рисунок 28 – Задание материала

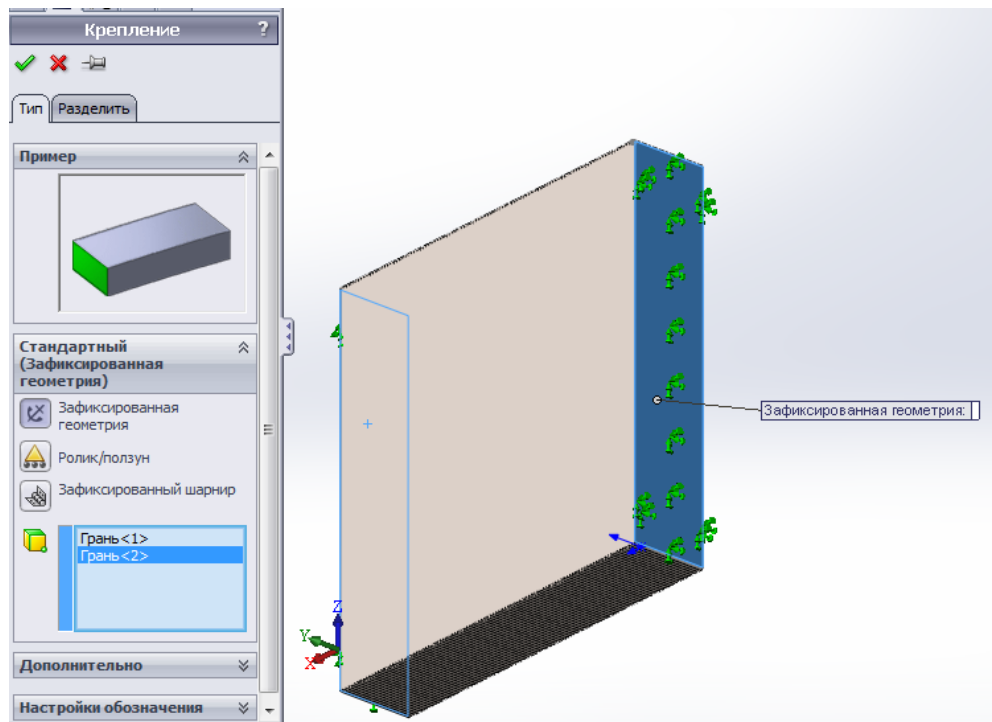


Рисунок 29 – Задание крепления

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	Изм. №	Подп. и дата
				Изм. №	Подп. и дата

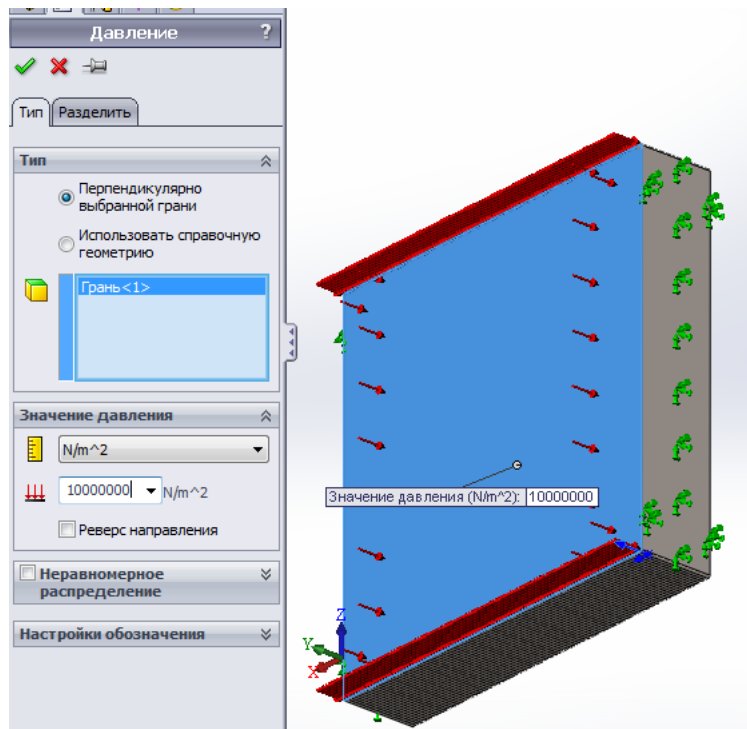


Рисунок 30 – Задание давления

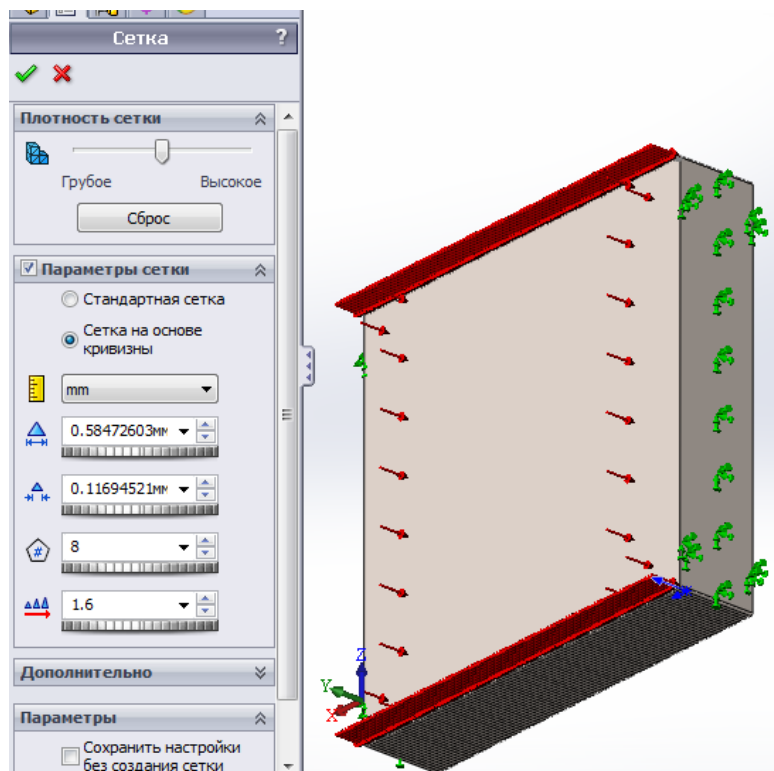


Рисунок 31 – Задание сетки

Инд. №	Подп. и дата
	Взам. инв.
Инд. №	Подп. и дата
	Инд. №
Инд. №	Изм.
	№ докум.

На рисунке 32 представлен результат моделирования воздействия давления равного 10 МПа на элементарный объем с эпюрами объемных деформаций. Пример отчета из программы SolidWorks представлен в приложении А. Максимальная деформация по краю мембраны составила $8,5 \cdot 10^{-4}\%$.

В таблице 5 приведены результаты моделирования воздействия давления на элементарный объем для трех структур. В ходе моделирования были получены значения напряжений и деформаций элементарного объема.

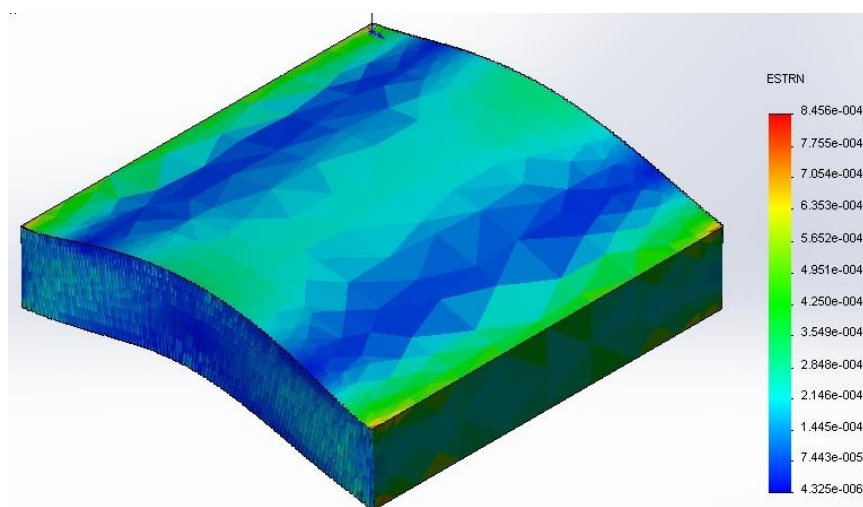


Рисунок 32 – Результат моделирования воздействия давления на элементарный объем с шагом 0,05 мм, без поперечного сдвига точек спекания слоев

Таблица 5 – Результаты моделирования.

Структура	Напряжение, N/m ²		Деформация, %	
	Min	Max	Min	Max
1	2	3	4	5
Шаг 0,05 мм, без поперечного сдвига точек спекания слоев	794.273	$2,36 \cdot 10^8$	$4,32 \cdot 10^{-6}$	0,00085

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5
Шаг 0,05 мм, поперечный сдвиг точек спекания слоев 0,025 мм	626.256	$2,52 \cdot 10^8$	$7,10 \cdot 10^{-6}$	0,00091
Шаг 0,025 мм, без поперечного сдвига точек спекания слоев	556.860	$8,23 \cdot 10^7$	$6,50 \cdot 10^{-6}$	0,00033

Из проведенного исследования следует вывод, что из выбранных структур оптимальной для изготовления деталей датчика разности давлений Метран – 150 CD является структура, сформированная с шагом 1,5 мм и поперечным сдвигом точек спекания слоев 0,75 мм. При толщине мембраны 1 мм будет обеспечено измерение давления 10 МПа.

В данном разделе выбрана структура наплавления слоев.

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист								
							Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	54			

4 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ НОВЫХ НАУЧНЫХ ИДЕЙ, КОНЦЕПЦИЙ, НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Датчики Метран – 150 – это целая линейка датчиков с различными техническими характеристиками. Закономерно следует вопрос – какую часть из этой линейки можно напечатать. Для ответа на этот вопрос сформируем 3D модель емкостной ячейки датчика давления, представленную на рисунке 33.

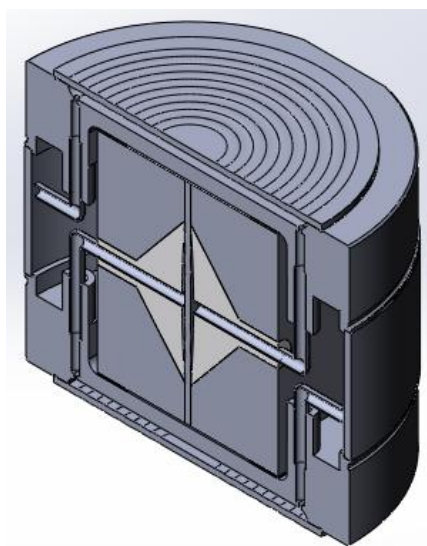


Рисунок 33 – 3D модель емкостной ячейки

Проведем моделирование, подавая на мембрану давления от 1 кПа до 10 МПа. Необходимо задать параметры моделирования: материал (Рисунок 34), крепление (Рисунок 35), давление (Рисунок 36), сетку (Рисунок 37).

На рисунке 38 представлен результат моделирования воздействия давления на мембрану с эпюрами объемных деформаций. Пример отчета из программы SolidWorks представлен в приложении Б. Фиксировать будем перемещение мембраны и напряжение в материале. Результаты представлены в таблице 6.

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Взам. инв.	Подп. и дата

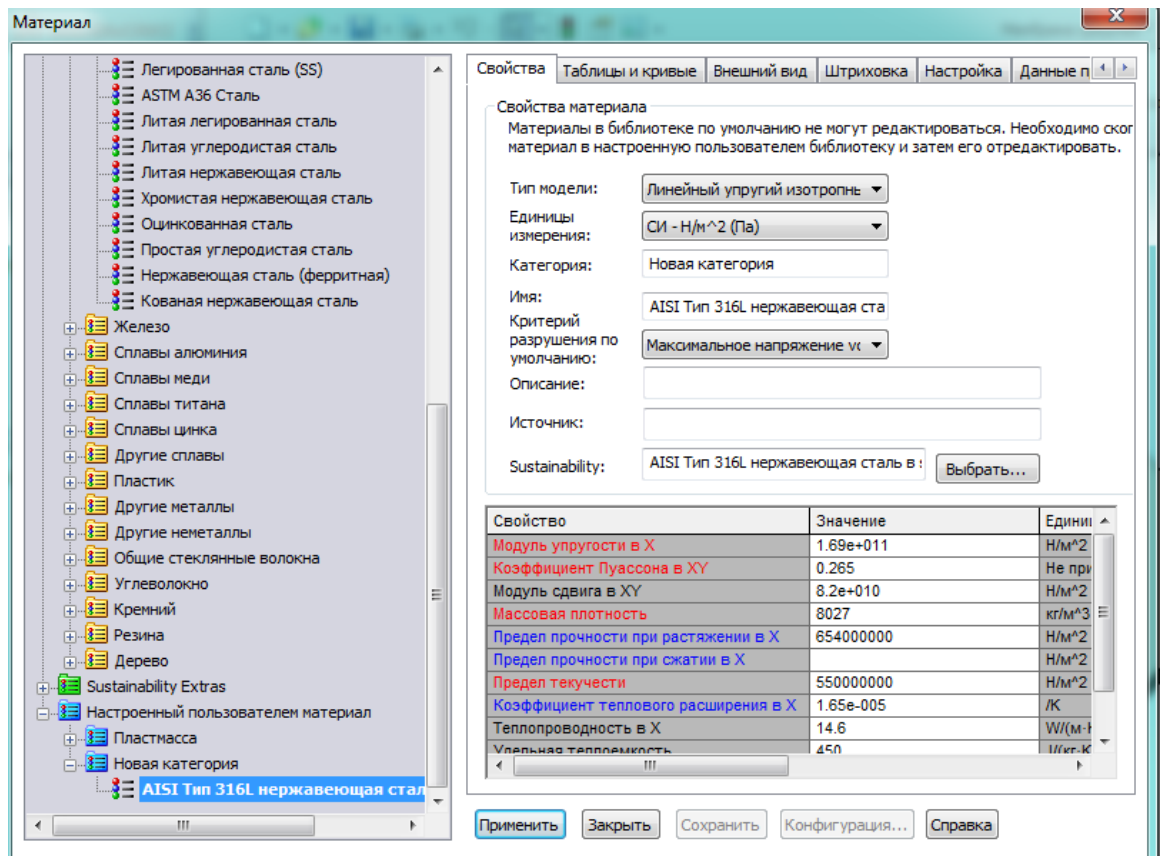


Рисунок 34 – Задание материала мембраны

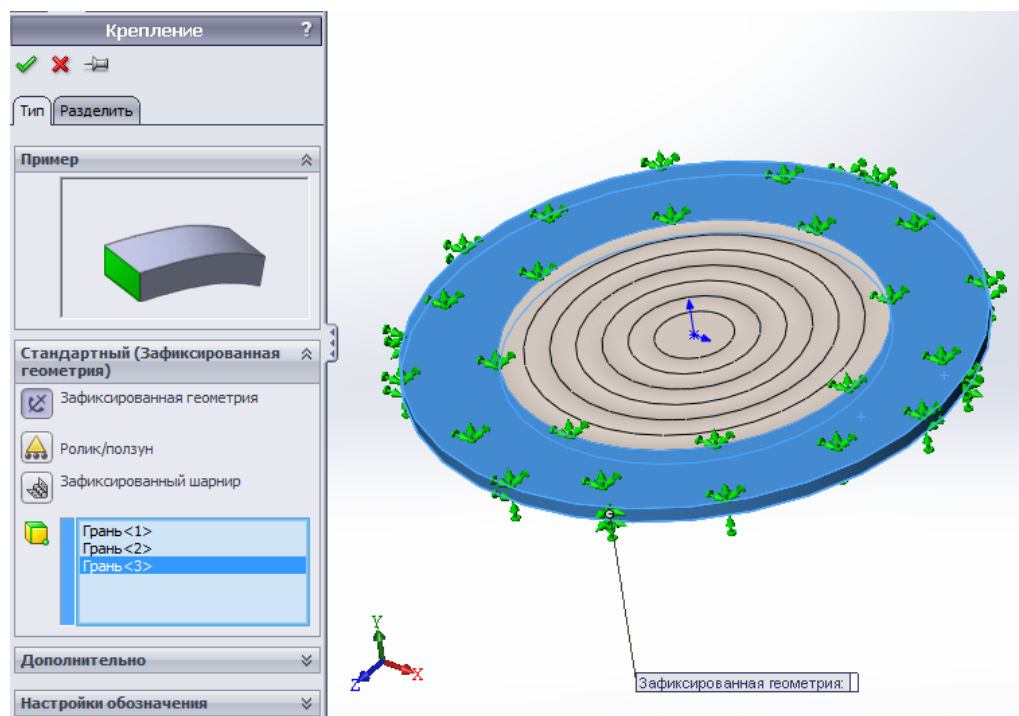


Рисунок 35 – Задание крепления мембраны

Изм. № Подп. и дата
 Взам. инв. №
 Инв. №
 Подп. и дата
 Инв. №

Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

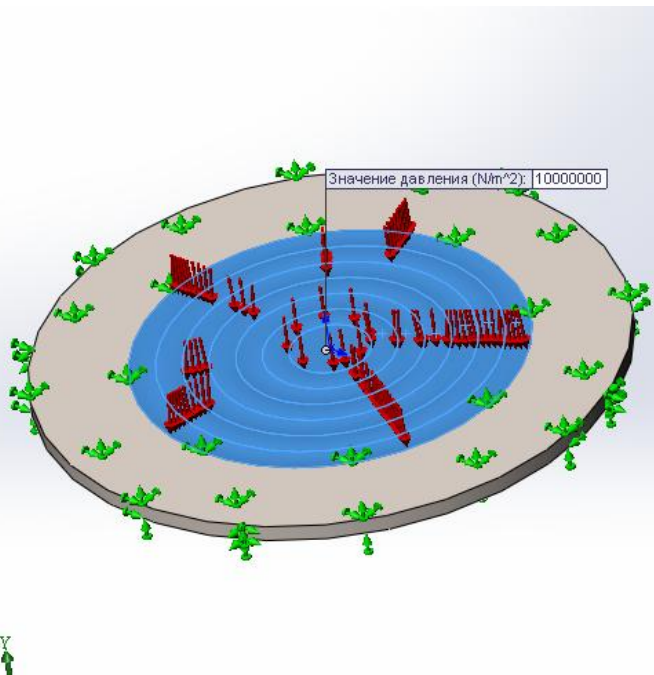
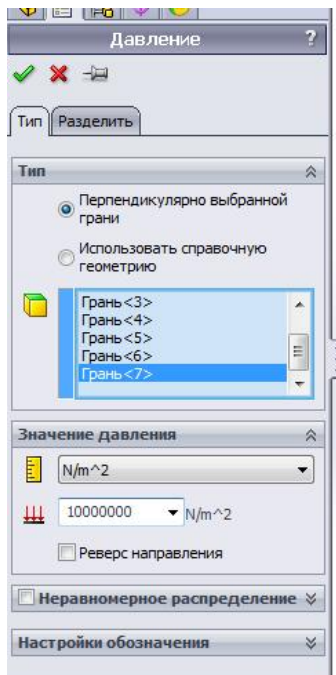


Рисунок 36 – Задание давления, действующего на мембрану

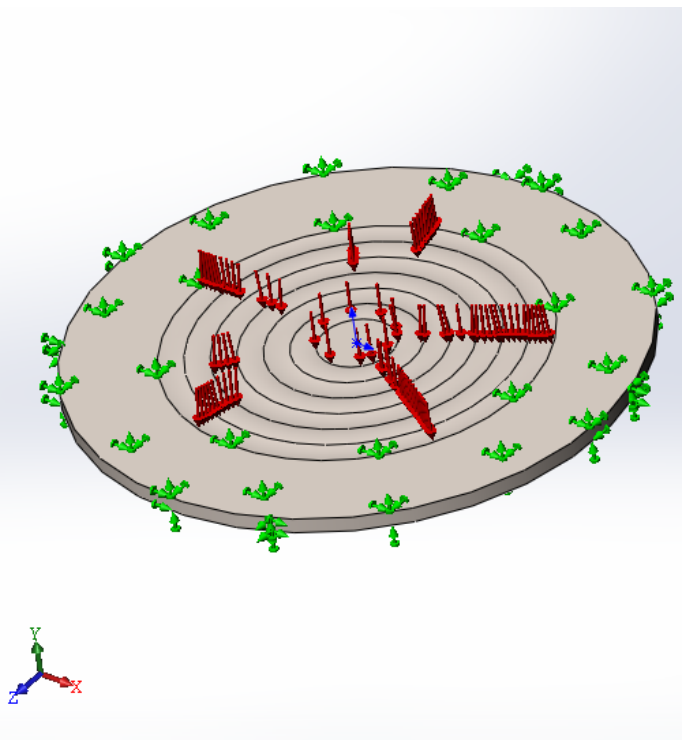
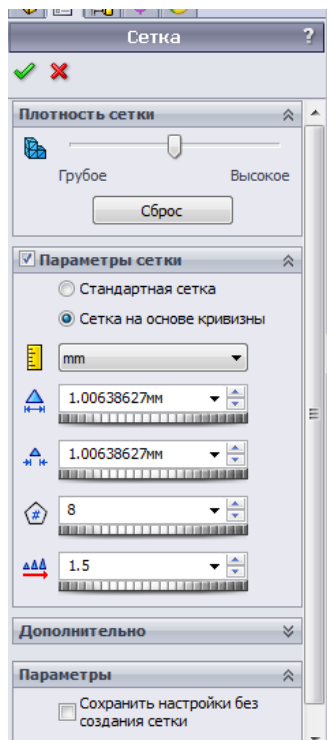


Рисунок 37 – Задание сетки мембраны

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Подп. и дата	Взам. инв.	Подп. и дата	Изн. №	Изн. №

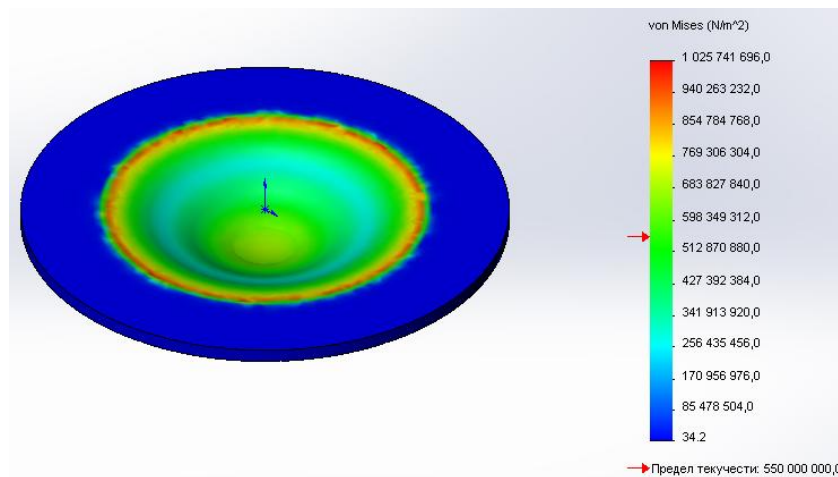


Рисунок 38 – Результат моделирования воздействия давления 10 МПа на мембрану

Таблица 6 – Результаты моделирования

№	Давление, p	Прогиб мембраны, λ (мм)	Напряжение, Q (Па)
1	2	3	4
1	10 МПа	0,22	$1,02 \cdot 10^9$
2	5 МПа	0,09	$5,13 \cdot 10^8$
3	2,5 МПа	0,05	$2,56 \cdot 10^8$
4	1 МПа	0,02	$1,03 \cdot 10^8$
5	500 кПа	$9,33 \cdot 10^{-3}$	$5,13 \cdot 10^7$
6	250 кПа	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$2,56 \cdot 10^7$
7	100 кПа	$4,66 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^7$
8	50 кПа	$9,33 \cdot 10^{-4}$	$5,13 \cdot 10^6$

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

Окончание таблицы 6

1	2	3	4
9	25 кПа	$4,66 \cdot 10^{-4}$	$2,56 \cdot 10^6$
10	10 кПа	$1,87 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^6$
11	5 кПа	$9,33 \cdot 10^{-5}$	$513 \cdot 10^3$
12	2,5 кПа	$4,66 \cdot 10^{-5}$	$256 \cdot 10^3$
13	1 кПа	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$103 \cdot 10^3$

Построим зависимость прогиба мембраны от давления (Рисунок 39).

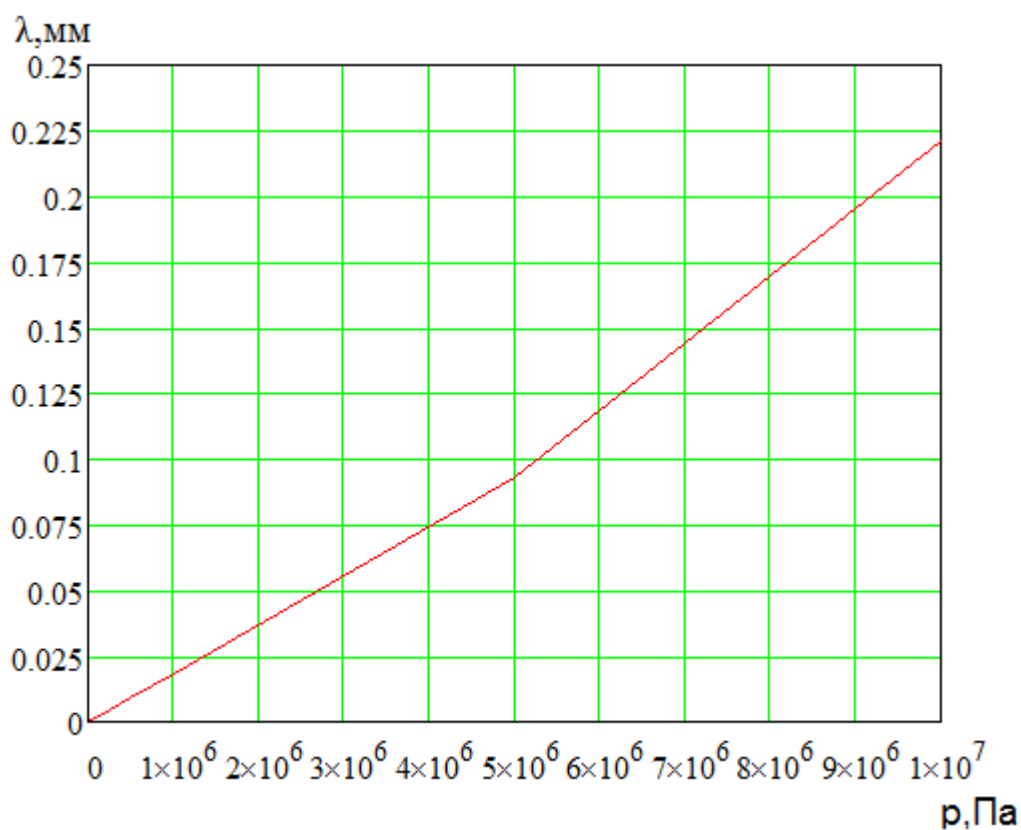


Рисунок 39 – Зависимость прогиба мембраны от давления

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

Что бы определить верхнюю границу диапазона давлений, в котором будет работать изготавливаемый датчик, необходимо сравнить напряжение, возникающее в материале, с пределом прочности этого материала. Для изготовления датчика был выбран порошковый материал – Сталь 1.4404 (316L), предел прочности которого равен 654 МПа. Из таблицы 6 выбираем напряжение меньшее этого значения $-5,13 \cdot 10^8$ Па. Данное напряжение возникает в мембране при давлении 5 МПа. Отсюда следует, что 5 МПа – это верхняя граница диапазона давлений изготавливаемого датчика.

Для определения нижней границы диапазона необходимо провести проверочный расчет. Подтвердить, при имеющемся напряжении питания, реализацию емкостной схемы регистрации перемещений мембраны.

Мембрана – подвижная обкладка дифференциального конденсатора.

Измерительная цепь емкостного преобразователя представлена на рисунке 40 [13].

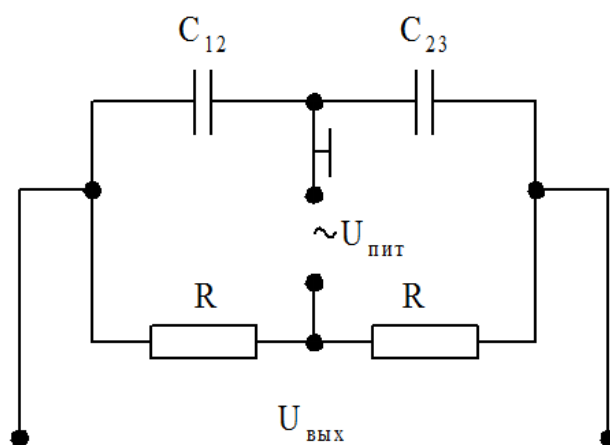


Рисунок 40 – Измерительная цепь емкостного преобразователя

Выходное напряжение разбаланса моста имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\frac{\lambda}{W} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{W}\right)^4}}{1 + \left(\frac{\lambda}{W}\right)^4} U_{\text{ПИТ}}, \quad (1)$$

где

Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №	Инд. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.

W – начальный зазор между электродом и мембраной;

λ – прогиб в центре мембраны;

$U_{\text{пит}}$ – напряжение питания.

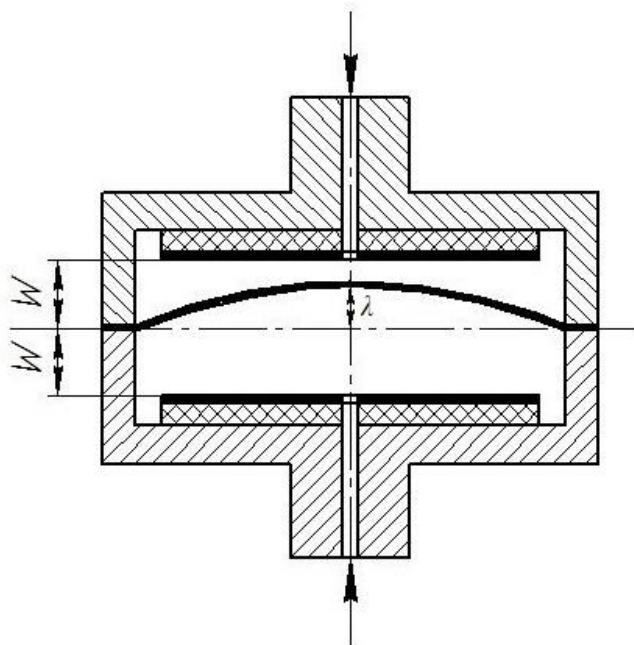


Рисунок 41 – Дифференциальный емкостный преобразователь

$U_{\text{пит}} = 42 \text{ В}$ [14].

λ – таблица 6, начиная с 0,09 мм (5 МПа).

$W=1 \text{ мм}$.

Полученные выходные напряжения представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Выходные напряжения

№	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	p	Прогиб мембраны, λ (мм)
1	2	3	4
2	3,92	5 МПа	0,09
3	1,96	2,5 МПа	0,05

Подп. и дата

Взам. инв.

Инв. №

Подп. и дата

Инв. №

Окончание таблицы 7

1	2	3	4
4	0,78	1 МПа	0,02
5	0,39	500 кПа	$9,33 \cdot 10^{-3}$
6	0,19	250 кПа	$1,87 \cdot 10^{-3}$
7	0,08	100 кПа	$4,66 \cdot 10^{-3}$
8	0,04	50 кПа	$9,33 \cdot 10^{-4}$
9	0,02	25 кПа	$4,66 \cdot 10^{-4}$
10	$7,84 \cdot 10^{-3}$	10 кПа	$1,87 \cdot 10^{-4}$
11	$3,92 \cdot 10^{-3}$	5 кПа	$9,33 \cdot 10^{-5}$
12	$1,96 \cdot 10^{-3}$	2,5 кПа	$4,66 \cdot 10^{-5}$
13	$7,84 \cdot 10^{-4}$	1 кПа	$1,87 \cdot 10^{-5}$

Построим зависимость выходного напряжения от давления (Рисунок 42).

Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата
Инд. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

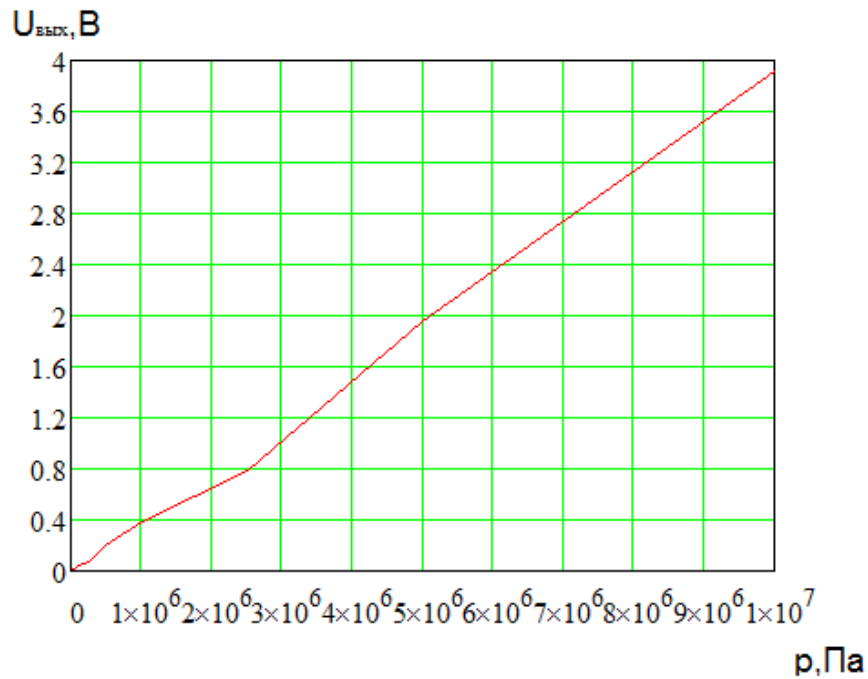


Рисунок 42 – Зависимость выходного напряжения от давления

Структурная схема датчика давления представлена на рисунке 43.

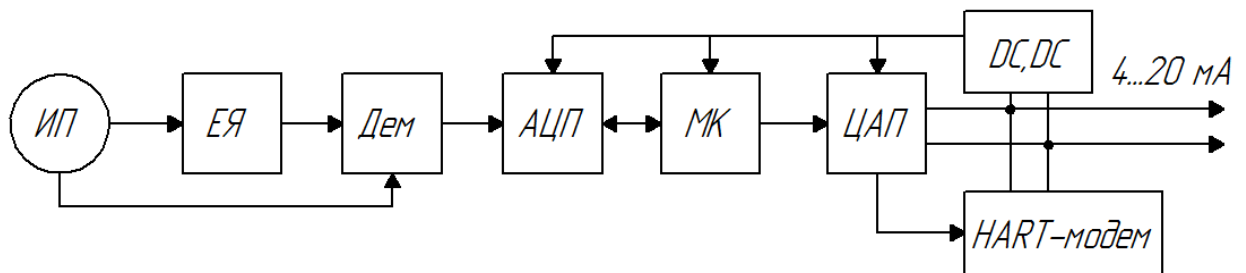


Рисунок 43 – Структурная схема датчика давления

Датчик давления имеет в своем составе: источник питания (ИП), емкостную ячейку (ЕЯ), демодулятор (Дем), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер (МК), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), стабилизатор питающего напряжения (DC,DC), HART-модем.

Минимальное давление, которое может зарегистрировать датчик давления, можно вычислить исходя из разрядности АЦП. Выберем АЦП – LC²MOSSingleSupply, 12-Bit 600 kSPS ADC AD7892 (Datasheet представлен в

Исп. №	Подп. и дата
Исп. №	Подп. и дата
Исп. №	Подп. и дата
Исп. №	Подп. и дата
Исп. №	Подп. и дата

приложении В). Критерием выбора является разрядность АЦП при согласованном его входном напряжении с выходным напряжением датчика.

Необходимо вычислить цену деления АЦП:

$$c = \frac{1}{2^n - 1}, \quad (2)$$

где $n = 12$, т.к. выбранный АЦП 12-битный.

Умножив c на максимальное давление датчика, получим минимальное давление:

$$p_{min} = \frac{p_{max}}{2^n - 1}. \quad (3)$$

$p_{max} = 5$ МПа.

$$p_{min} = \frac{5000000}{2^{12} - 1} = 1221 \text{ Па.}$$

Нижняя граница диапазона измеряемых давлений 1221 Па.

Рассчитанный диапазон измеряемых давлений 1221 Па – 5 МПа.

Согласно ГОСТ 22520-85 Датчики давления, разрежения, и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП [8] выберем стандартный диапазон измерения: от 1,6 кПа до 4 МПа.

В данном разделе рассчитаны границы диапазона измеряемых давлений.

Инв. №	Подп. и дата	Взам. инв.	Подп. и дата	Инв. №	12.04.01.2018.525 ПЗ					Лист		
										64		
					Изм.	№ докум.	Подп.	Дат				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был выбран метод – Выборочная лазерная плавка и материал – Сталь 1.4404 (316L) для разработки корпуса и мембраны датчика давления с емкостной ячейкой. Разработаны методика изготовления датчика давления с применением аддитивных технологий и методика исследования его свойств. Построена модель датчика давления с емкостной ячейкой в программе SolidWorks. Выбрана структура наплавления слоев, сформированная с шагом 1,5 мм и поперечным сдвигом точек спекания слоев 0,75 мм. Рассчитаны границы диапазона измеряемых давлений – от 1,6 кПа до 4 МПа.

В данной работе были решены задачи:

- Выполнен аналитический обзор методов изготовления деталей и материалов, применяемых для 3D печати.
- Разработаны методика изготовления датчика давления с применением аддитивных технологий и методика исследования его свойств.
- Разработан датчик давления с емкостной ячейкой с заданными техническими характеристиками.
- Экспериментально подтверждены результаты исследования.

Таким образом, цель данной работы достигнута.

Инд. №	Подп. и дата	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
Инд. №	Подп. и дата	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата		65
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат			

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акарачкин С.А. Применение аддитивной технологии при изготовлении каркаса статора электродвигателя-маховика. / С.А. Акарачкин, Д.В. Ермаков // Вестник СибГАУ. – 2017. – Т.18, №1. – С. 10–14.
2. Алешин Н.П. Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления, и возможности методов неразрушающего контроля для их обнаружения. / Н.П. Алешин, В.В. Мурашов, А.Г. Евгенов и др. // Дефектоскопия. – 2.
3. Алешин Н.П. Некоторые особенности исследований деталей, изготовленных по аддитивным технологиям, методом рентгеновской компьютерной томографии. / Н.П. Алешин, М.В. Григорьев, О.А. Крупнина, Н.А. Щипаков // Дефектоскопия. – 2018. – № 4. – с. 42-48.
4. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. - М.: Мир, 1989. - 62-75 С.
5. Выборочная лазерная плавка – http://3dtoday.ru/wiki/SLM_print/.
6. Высоцкий А.А. SLM-печать в двигателестроении. / А.А. Высоцкий // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т.1 – С. 188–189.
7. Горбовец М.А. Усталостные свойства жаропрочных материалов, полученных методом SLM. / М.А. Горбовец, А.Г. Евгенов, И.А. Ходинев, М.И. Лукьянова // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. науч. тр. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2014.
8. ГОСТ Р 22520-85. Датчики давления, разрежения, и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1986. – 24 с.
9. ГОСТ 23887-79. Сборка. Термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 19 с.

Инд. №	Подп. и дата					12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
Инд. №	Подп. и дата						66
Взам. инв.	Подп. и дата						
Инд. №	Подп. и дата	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат		

- 10.ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: «Стандартинформ», 1983. – 15 с.
- 11.ГОСТ Р 57558-2017/ ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2017. – 16 с.
- 12.Гришаев Р.В. Моделирование плавления и кристаллизации при селективном лазерном спекании с инъекцией металлических порошков / Р.В. Гришаев, Ф.Х. Мирзаде, В.Г. Низьев и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – №1. – С. 12 – 23.
- 13.Датчик давления: методические указания /сост. Ю.А. Дадаян. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2008. – 27 с.
- 14.Датчик давления Метран-150 – <http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/brands/Metran/products/Pressure/transmitters/metran-150/Pages/index.aspx>.
- 15.Датчик давления НМР 331 – <http://www.bdsensors.ru/ru/davlenie/datchiki-davleniya/hmp-331-intellektualnyj-datchik-davleniya-dlya-kontrolya-tehnologicheskikh-processov.html>.
- 16.Датчики перепада давления STD800 – <http://www.pribor-service.ru/c.php?id=18675>.
- 17.Дворянинова Т.П. Оценка производительности селективного лазерного спекания. / Т.П. Дворянинова, А.В. Жданов, Л.В. Беляев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – №3. – С. 122–125.
- 18.История создания 3D принтер. – URL: <http://zbotcc.ru/istoriya-sozdaniya-3d-printerov>.
- 19.Как 3D-печать внедряется в производственный процесс – <https://geektimes.ru/company/3dprintus/blog/245048/>.
- 20.Краткая история 3D принтеров. – URL: <http://plastic3d.ru/news/Kratkaya-istoriya-3D-printerov-s-kartinkami>.

Инд. №	Подп. и дата	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инд. №	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
											67

21. Любимов В.В. Технология синтеза многослойных систем на полимерных основаниях, полученных методом быстрого прототипирования / В.В. Любимов, М.С. Саломатников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 9. Ч. 2. – С. 336–344.
22. Металлы для 3D печати – http://3d.globatek.ru/3d_printing_materials/metal/.
23. Морозов В.В. Микрогеометрия поверхности после селективного лазерного спекания металлического порошка. / В.В. Морозов, В.Г. Гусев, Т.П. Дворянинова // Вестник машиностроения. – М.: Иновационное машиностроение, 2016. – С. 62–65.
24. Нержавеющая сталь – <http://www.nerjstal.ru/markistali/65-importnye/246-aisi-316-316l-316ti/>.
25. Никонов К.П. Исследование теплового режима датчика давления в САПР SolidWorks. / К.П. Никонов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 173–176.
26. НПО Энергомаш. Аддитивные технологии в ракетных двигателях - <https://www.roscosmos.ru/24752/>.
27. Овчинников В.А. Причины неоднородного лазерного сплавления смеси мелкодисперсных порошков титана и ниобия / В.А. Овчинников, Р.Г. Ахметшин, А.В. Разин, К.С. Костиков, А.Н. Яковлев, Н.В. Мартюшев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11. – С. 109.
28. ОДК ведет разработку вертолетного двигателя нового поколения – ПДВ – http://www.uecrus.com/rus/presscenter/odk_news/?ELEMENT_ID=2842.
29. Пат. 2438939 Российская Федерация, МПК: В 64 G 1 66, В 64 G 4 00. Устройство для изготовления объемных деталей и конструкций в космическом пространстве / Ю.М. Урличич. – № 2010135856/11; опубли. 26.08.10.
30. Программа для 3D принтера – <https://3dpt.ru/page/soft>.

Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата
Взам. инв.	Подп. и дата
Инв. №	Подп. и дата

31. Сапрыкин А.А. Материалы, используемые в селективном лазерном спекании / А.А. Сапрыкин, Е.В. Бабакова, Д.В. Дудихин // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015.
32. Сафронов В.А. Получение тонкостенных моделей методом селективного лазерного плавления из материала БрА9. / В.А. Сафронов, Р.С. Хмыров, И.В. Шишковский // Материалы и технологии XXI века: сб. науч. тр. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2015. – С. 83–86.
33. Силуянова М.В. Создание равнопрочных конструкций силовых элементов с использованием технологии селективного лазерного спекания (SLM). / М.В. Силуянова, Т.Р. Дзгоев // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: сб. науч. тр. – М.: Типография .
34. Технологии 3D печати. Принципы, возможности, расходные материалы, цены – http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml.
35. Федорова Д.К. Исследование обрабатываемости заготовки из стали 316L, полученных методом селективного лазерного сплавления. / Д.К. Федорова, Д.В. Иволга, В.П. Алексеев, А.В. Балякин // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – 2016. –
36. Черных М.М. Трехмерная печать – технология будущего. / М.М. Черных, Д.В. Куваева // Gaudeamus Igitur. – 2015. – № 1. – С. 37– 40.
37. Шипицина Т.Н. Методы исследования показателей качества деталей, изготовленных по SLM-технологии. / Т.Н. Шипицина // Фундаментальная и прикладная наука: основные итоги 2017 г.: сб. науч. тр. – СПб.: CreateSpace, 2017. – с. 56-59.
38. Шишковский И.В. Комбинаторное конструирование сплавов методами лазерных аддитивных технологий. / И.В. Шишковский // Станкоинструмент. – 2017. – № 3(8) – С. 38–49.

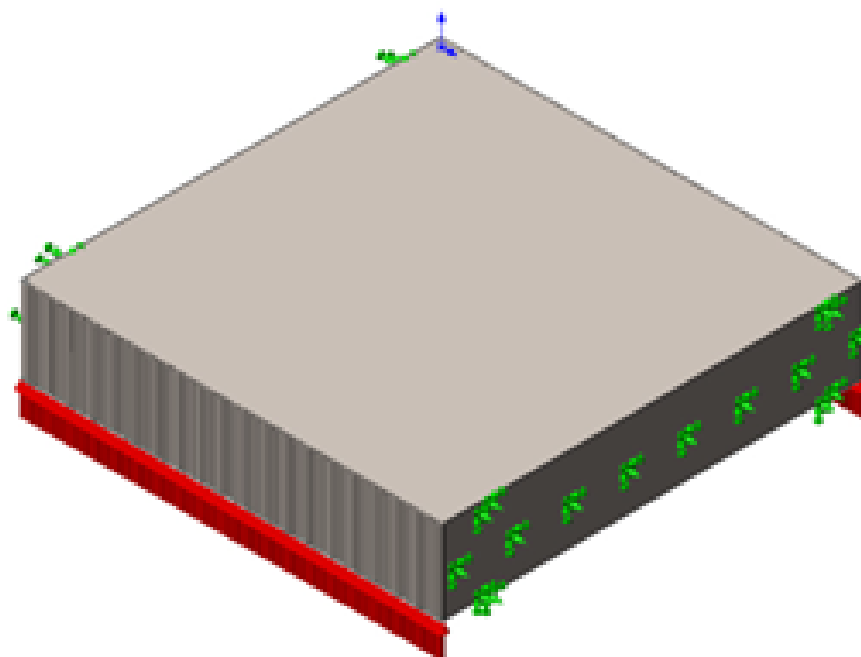
Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инв. №	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист

39. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. – М.:Физматлит, 2009. – 138-150 с.
40. EJA110E/120E/130E – <http://www.etalon-chel.ru/catalog/?id=88>.
41. JUMO dTRANS p02 DELTA – <http://www.jumo.ru/catalog/detail.php?ID=120>.
42. LD301 Датчик давления HART – <http://esma-rt.ru/pr%D0%BEduktsiya/ld301-d%D0%B0tchik-d%D0%B0vl%D0%B5niya-hart>.
43. Printing transparent glass in 3-D // MIT News. 2015. URL: <http://news.mit.edu/2015/3-dprinting-transparent-glass-0914>.
44. Rosemount — <http://www2.emersonprocess.com/ru-ru/brands/rosemount/Pages/index.aspx>.
45. SITRANS P DSIII – <http://www.ste.ru/siemens/pressure.html>.
46. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
47. SolidWorks – <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.
48. Volyanski I. Послойный лазерный синтез интерметаллидов системы Cu–Al–Ni и эффект памяти формы. / I. Volyanski, И.В. Шишковский, I. Yadroitsev, В.И. Щербаков, Ю.Г. Морозов // Неорганические материалы. – 2016. – Т.52, № 6 – С. 617–623.
49. 3D печать STL-файлов: пошаговое руководство – <https://3dprinter.ua/3d-pechat-stl-fajlov-poshagovoe-rukovodstvo/>.
50. 3D принтер Renishaw AM250 – <http://3dtoday.ru/3d-printers/renishaw/renishaw-am250/>.

Инд. №	Подп. и дата	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инд. №	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	12.04.01.2018.525 ПЗ	Лист
											70

ПРИЛОЖЕНИЕ А

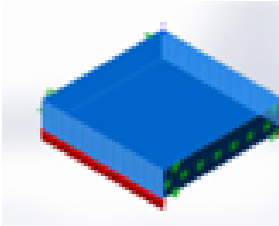
Информация о модели



Имя модели: 1 вариант

Активная конфигурация: По умолчанию

Твердые тела

<L_MdInf_SldBd_Nm>	Рассматривается как	Объемные свойства	Путь документа /Дата изменения
<p style="text-align: center;">Линейный массив?</p> 	Твердое тело	<p style="text-align: center;"> Масса:0.000200244 kg Объем:2.49463e-008 m^3 Плотность:8027 kg/m^3 Масса:0.00196239 N </p>	<p style="text-align: center;"> C:\Users\Admin\Desktop\Дрином\матрица\матрица\элементарного объема\1 вариант.SLDPRT Apr 28 18:19:41 2018 </p>
<L_MdInf_Sh1Bd_Nm>	<L_MdIn_Sh1Bd_Fr>	<L_MdInf_Sh1Bd_VolProp>	<L_MdIn_Sh1Bd_DtMd>

Подп. и дата

Взам. инв.

Инв. №

Подп. и дата

Инв. №

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист

71

Изм. № докум. Подп. Дат

<L_MdInf_CpBd_Nm>	<L_MdInf_CompBd_Props>		
<L_MdInf_BmBd_Nm>	<L_MdIn_BmBd_Fr>	<L_MdInf_BmBd_VolProp>	<L_MdIn_BmBd_DtMd>

Свойства исследования

Имя исследования	Исследование 1
Тип анализа	Статический анализ
Тип сетки	Сетканатвердомтеле
Тепловой эффект:	Вкл
Термический параметр	Включить тепловы нагрузки
Температура при нулевом напряжении	298 Kelvin
Включают эффекты давления жидкости из SolidWorks Flow Simulation	Выкл
Тип решющей программы	FFEPPlus
Влияние нагрузок на собственные частоты:	Выкл
Мягкая пружина:	Выкл
Инерционная нагрузка:	Выкл
Несовместимые параметры связи	Автоматические
Большие перемещения	Выкл
Вычислить силы свободных тел	Вкл

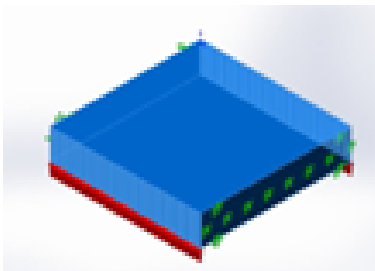
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	Изм. №	Взам. инв.	Подп. и дата
				Изм. №	Взам. инв.	Подп. и дата

Трение	Выкл
Использовать адаптивный метод	Выкл
Путь к результатам	Документ SolidWorks (C:\Users\Admin\Desktop\Диплом магистратура\моделирование элементарного объема)

Единицы измерения

Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m ²

Свойства материала

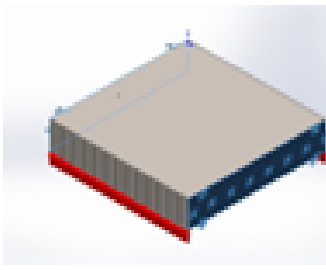
Ссылаясь на модель	Свойства	Компоненты
	<p>Имя: AISI Тип 316L нержавеющая сталь</p> <p>Тип модели: Линейный/Упруго-пластичный/Изоотропный</p> <p>Критерий прочности: Максимальное напряжение</p> <p>умножение: пределе von Mises</p> <p>Предел текучести: 5.5e+008 N/m²</p> <p>Предел прочности: 6.54e+008 N/m²</p> <p>модуль упругости: 1.69e+011 N/m²</p> <p>Коэффициент Пуассона: 0.265</p>	<p>Твердое тело</p> <p>1 (Линейный/массив2)(1 вариант)</p>

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Подп. и дата	Взам. инв.	Изн. №	Подп. и дата	Изн. №

12.04.01.2018.525 ПЗ

	Плотность: 8027 kg/m^3 Модуль упругости: $8.2e+010 \text{ N/m}^2$ Коэффициент температурного расширения: $1.65e-005 /\text{K}^{\circ}\text{C}$	
Данные отсутствуют		

Нагрузки и крепления

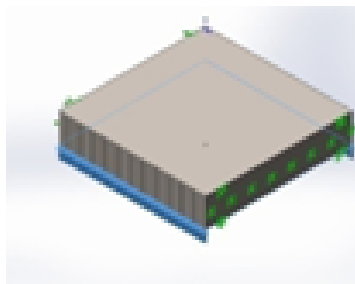
Имя нагрузки	Объемная нагрузка	Параметры нагрузки
Зафиксированный-1		Объекты: 2 грани Тип: Зафиксированная геометрия

Результирующие силы

Компоненты	X	Y	Z	Результирующая
Сила реакции(N)	-0.000615358	-249.458	0.00053715	249.458
Реактивный момент(N·м)	0	0	0	0

Имя нагрузки	Загрузка/объекты	Загрузка/параметры

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Давлени e-1		Объекты:	1 грани
		Тип:	Перпендикуляр выбранной грани
		Значение:	1e+007
		Единицы измерения:	N/m^2

Информация о сетке

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Сетка на основе кривизны
Точки Якобиана	4 Точки
Максимальный размер элемента	0.584726 mm
Минимальный размер элемента	0.116945 mm
Качество сетки	Высокая

Информация о сетке - Подробности

Всего узлов	75892
Всего элементов	44979
Максимальное соотношение сторон	49.111
% элементов с соотношением сторон < 3	43.2
% элементов с соотношением сторон > 10	11.1
% искаженных элементов (Якобиан)	0
Время для завершения сетки (hh; mm; ss):	00:00:10
Имя компьютера:	LENOVO-PC

Подп. и дата

Взам. инв.

Инв. №

Подп. и дата

Инв. №

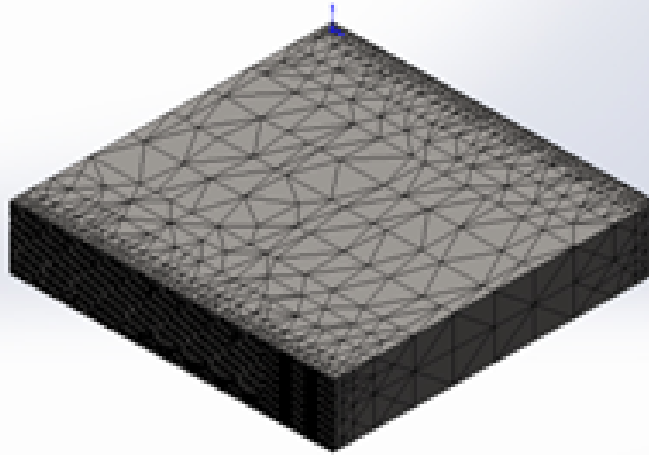
12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист

75

Изм. № докум. Подп. Дат

Исследование 1 элемент
 (Векторное поле напряжений)
 Таблица: Силы и моменты реакции



Результирующие силы

Силы реакции

Выбран ный набор	Едини цы измерения	Сум ма по X	Су мма по Y	Сумма по Z	Результирующая
всей модели	N	- 0.000615333 8	- 249.438	0.0003371 5	249.438

Моменты реакции

Выбран ный набор	Единиц ы измерения	Сумма по X	Сумма по Y	Сумма по Z	Результи рующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

Результаты исследования

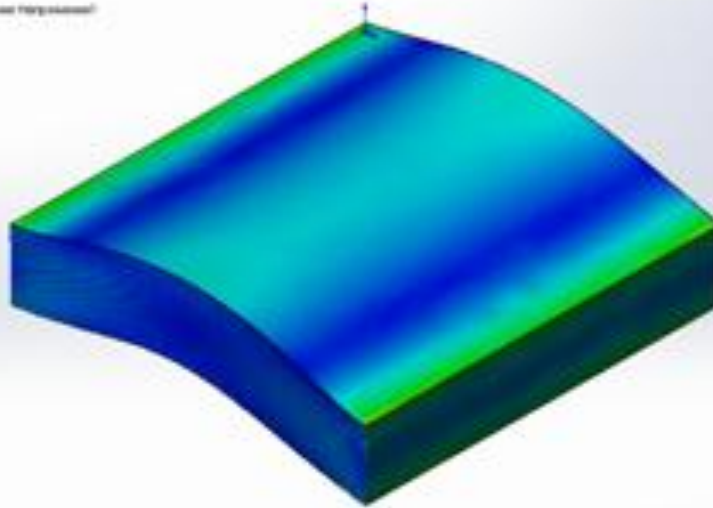
Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

12.04.01.2018.525 ПЗ

Имя	Тип	Мин	Макс
Напряжение1	VON: Напряжение1 Von: Макс	794273 N/m ² Узел: 822	2.36053e+008 N/m ² Узел: 205

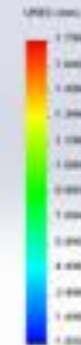
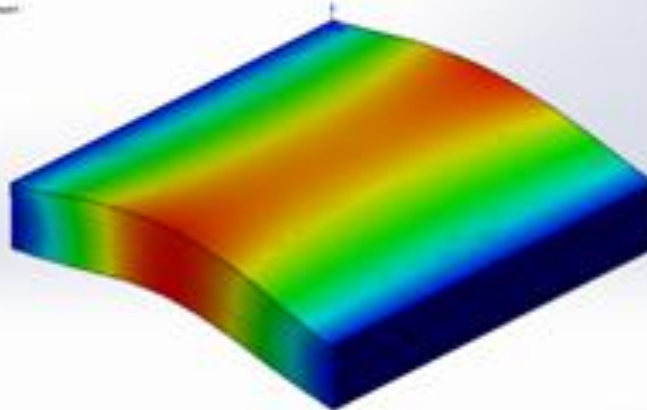
Меню: 1 вариант
Имя исследования: Исследование 1
Тип задачи: Статический анализ (линейное упругое поведение)
Идентификатор: 279 120



1 вариант-Исследование 1-Напряжение-Напряжение 1

Имя	Тип	Мин	Макс
Перемещение1	URES: Реакция сдвигового типа перемещение	0 mm Узел: 3	0.00179859 mm Узел: 13985

Меню: 1 вариант
Имя исследования: Исследование 1
Тип задачи: Статический анализ (линейное упругое поведение)
Идентификатор: 279 120



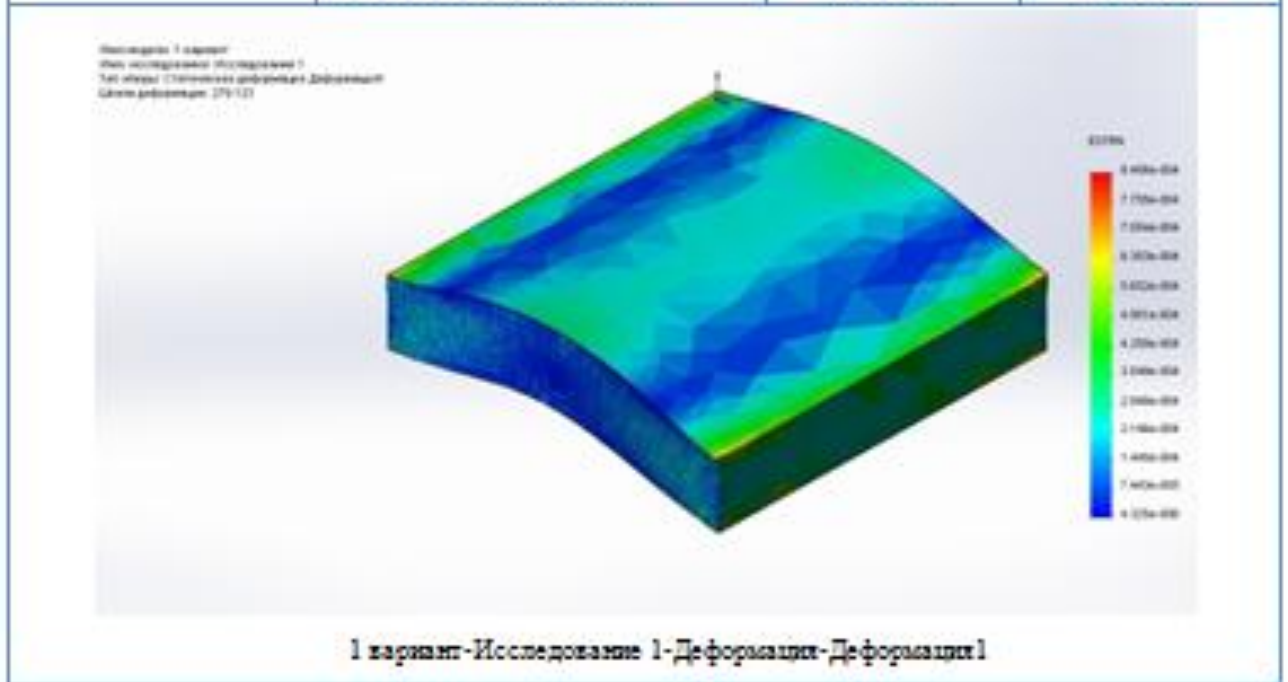
1 вариант-Исследование 1-Перемещение-Перемещение 1

Имя	Инд. №	Подп. и дата
Имя	Инд. №	Подп. и дата
Имя	Инд. №	Подп. и дата
Имя	Инд. №	Подп. и дата
Имя	Инд. №	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
------	----------	-------	-----

Имя	Тип	Мин	Макс
Деформация1	ESRN: Сдвиг в ленте на деформации1	4.32537e-006 Элемент: 41088	0.000845606 Элемент: 11764

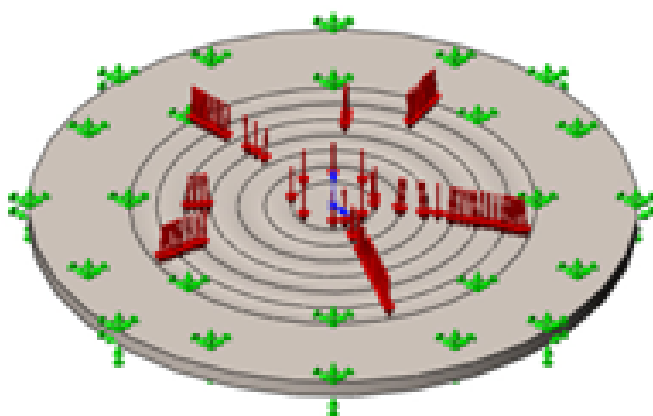


Имя	№	Подп.	и дата
Имя	№	Подп.	и дата
Имя	№	Подп.	и дата
Имя	№	Подп.	и дата
Имя	№	Подп.	и дата

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

12.04.01.2018.525 ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Имя модели: Мембрана средняя
Активная конфигурация: По умолчанию

Твердые тела

<L_MdInf_SldBd_N m/>	Рассматривается как	Объемные свойства	Путь документа (Др га изменения)
Поверхность4 	Твердое тело	Масса:0.00817049 kg Объем:1.01788e-006 m³ Плотность:8027 kg/m³ Масса:0.0900708 N	C:\Users\Admin\Desktop\Дорогом магистратуры\Модель датчика\Мембрана средняя.SLD PRT May 20 16:09:44 2018
<L_MdInf_Sh1Bd_N m/>	<L_MdIn_Sh1 Bd_Fr/>	<L_MdInf_Sh1Bd_VolPr op/>	<L_Md In_Sh1Bd _DtMd/>

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Изм. №	Подп. и дата	Взам. инв.	Подп. и дата

<L_MdInf_CpBd_N m>	<L_MdInf_CompBd_Props>		
<L_MdInf_BmBd_ Nm>	<L_MdIn_BmBd_ Fr>	<L_MdInf_BmBd_VolPr op>	<L_ MdIn_ BmBd _DtMd >

Свойства исследования

Имя исследования	Исследование 1
Тип анализа	Статический анализ
Тип сетки	Сетка твердотела
Тепловой эффект:	Вкл
Термический параметр	Включить тепловы нагрузки
Температура привязки на напряжен	298 Kelvin
Включают эффекты давления жидкости из SolidWorks Flow Simulation	Вкл
Тип решающей программы	FFEPlus
Влияние нагрузок на собственные частоты:	Вкл
Мягкая пружина:	Вкл
Инерционная разгрузка:	Вкл
Несовместимые параметры связи	Автоматические
Большие перемещения	Вкл

Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №	Изн. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.	Взам. инв.

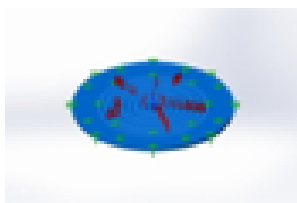
12.04.01.2018.525 ПЗ

Вычислить силы свободных тел	Вкл
Трение	Вкл
Использовать адаптивный метод	Вкл
Папка результатов	Документ SolidWorks (C:\Users\Admin\Desktop\Диплом магистратура\Модель датчика)

Единицы измерения

Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m ²

Свойства материала

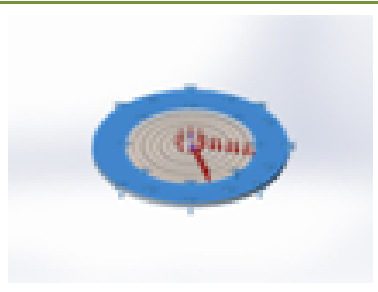
Ссылка на модель	Свойства	Компоненты
	Имя: AISI Тип 316L нержавеющая сталь	Твердое тело 1 (Поверхность) (Мембрана средняя)
	Тип модели: Диаметр 10 мм	
	Контроль прочности: Максимальное напряжение von Mises	
	Предел текучести: 5.5e+008 N/m ²	
	Предел прочности: 6.54e+008 N/m ²	
	Предел выносливости: N/m ²	

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Модуль нагрузки	1.69e+011	
	N/m^2	
Коэффициент Пуассона:	0.265	
Массовая плотность:	8027 kg/m^3	
Модуль деформации:	8.2e+010	
	N/m^2	
Коэффициент теплового расширения:	1.65e-005	
	/Keln	

Данные отсутствуют N/A

Нагрузки и крепления

Имя таблица	Изображение таблицы	Параметры таблицы
Зафиксированный-1		Объекты: 2 грани Тип: Зафиксированная геометрия

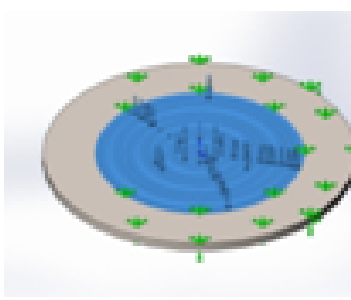
Результрующие силы

Компоненты	X	Y	Z	Результирующая
Сила реакции(N)	-0.0471547	4523.78	0.00633593	4523.78
Реактивный момент(N·щ)	0	0	0	0

Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Изм. №	Подп. и дата
Изм. №	Подп. и дата
Изм. №	Подп. и дата

Изм. №	Взам. инв.
Изм. №	Взам. инв.
Изм. №	Взам. инв.

Имя параметра	Загрузить изображение	Загрузить данные
Давление e-1		<p>Объекты: 7 грани</p> <p>Тип: Центральный элемент выбранной грани</p> <p>Значение: 1e+007</p> <p>Единицы измерения: N/m^2</p>

Результирующие силы

Силы реакции

Выбранный набор	Единицы измерения	Сумма по X	Сумма по Y	Сумма по Z	Результирующая
всей модели	N	-0.0471547	4323.78	0.00633393	4323.78

Моменты реакции

Выбранный набор	Единицы измерения	Сумма по X	Сумма по Y	Сумма по Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

Результаты исследования

Имя	Тип	Мин	Макс
напряжение	VON: Напряжение Von Mises	34.2076 N/m^2 Узел: 9251	1.02374e+00 9 N/m^2 Узел: 6303

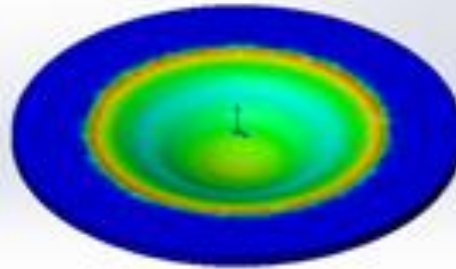
Имя инв. №	Имя инв. №	Имя инв. №	Имя инв. №
Подп. и дата	Взам. инв.	Имя инв. №	Подп. и дата
Имя инв. №	Имя инв. №	Имя инв. №	Имя инв. №
Имя инв. №	Имя инв. №	Имя инв. №	Имя инв. №

12.04.01.2018.525 ПЗ

Лист
83

Изм. № докум. Подп. Дат

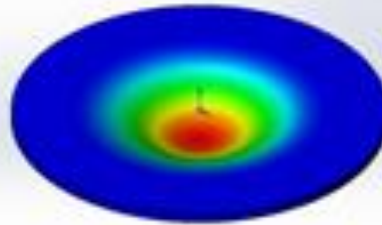
Инженерное бюро "Сибирь-Строй"
 100000, Новосибирск, ул. Советская, 1
 Тел: (383) 333-3333
 E-mail: info@sb-sib-stroy.ru



Мембрана средних-Исследование 1-Напряжения-Напряжения 1

Имя	Тип	Мин	Макс
Перемещение1	URES: Результат расчета перемещения	0 mm Узел: 300	0.220803 mm Узел: 18587

Инженерное бюро "Сибирь-Строй"
 100000, Новосибирск, ул. Советская, 1
 Тел: (383) 333-3333
 E-mail: info@sb-sib-stroy.ru

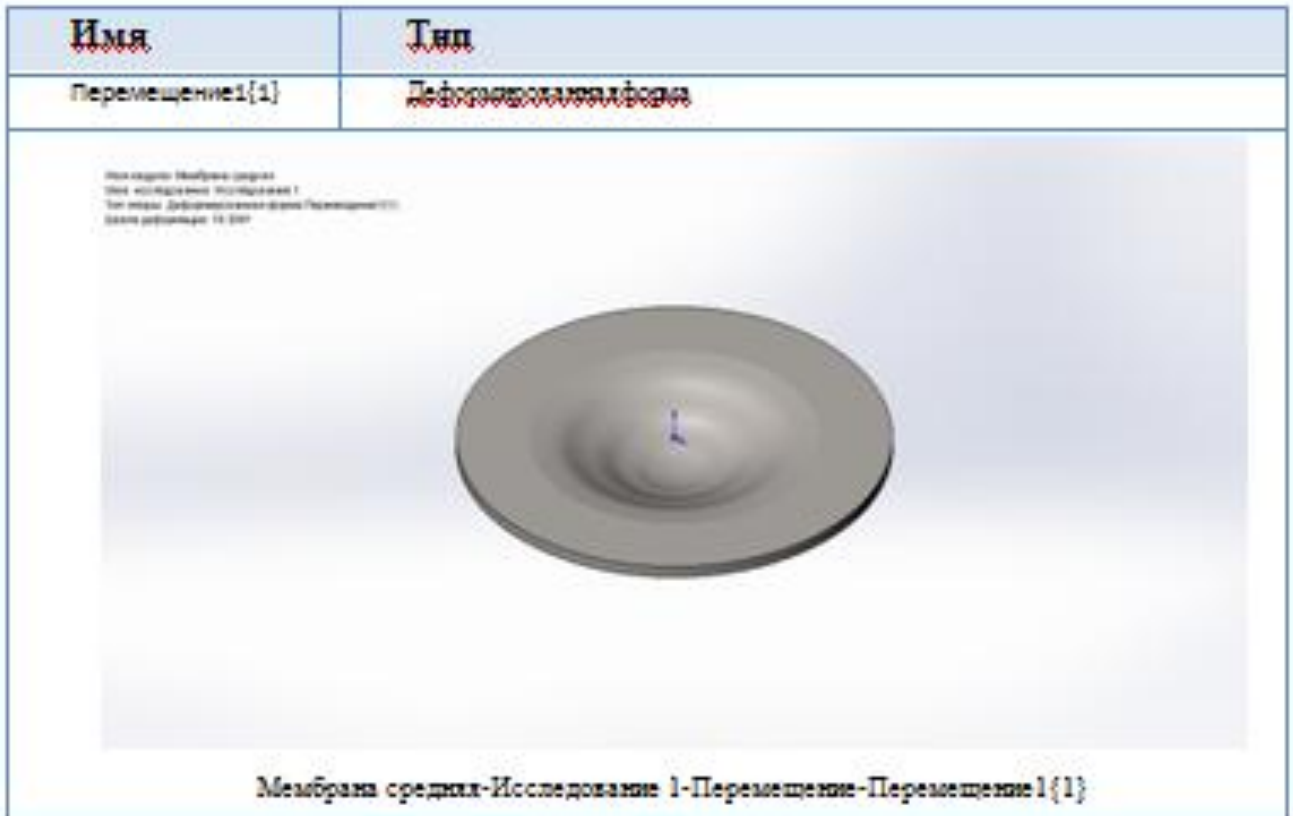
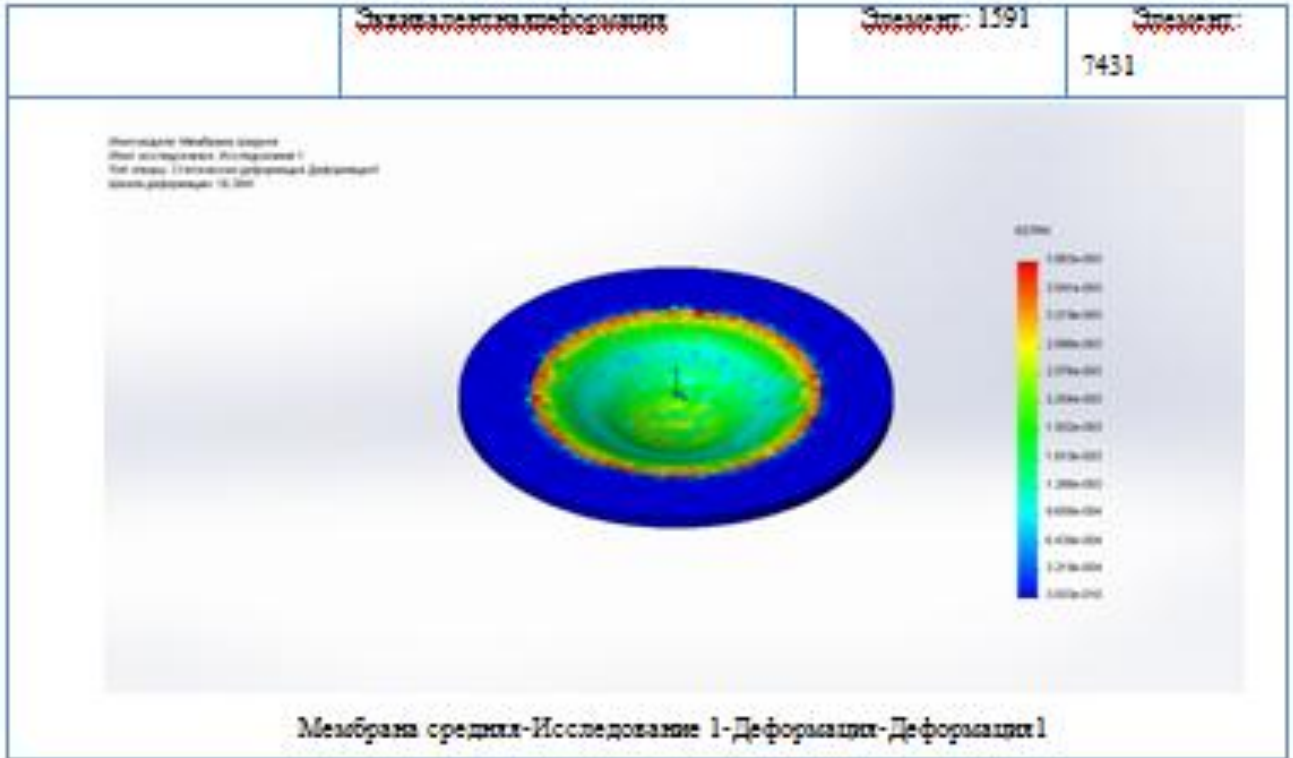


Мембрана средних-Исследование 1-Перемещение-Перемещение 1

Имя	Тип	Мин	Макс
Деформация1	ESTRN:	3.833e-010	0.00386335

Инв. № Подп. и дата
 Инв. № Подп. и дата
 Инв. № Подп. и дата
 Инв. № Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ



Имя	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата

12.04.01.2018.525 ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата		Лист	
						12.04.01.2018.525 ПЗ	86
	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат			

