

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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
_____ 2018 г.

**Разработка датчика давления с применением новых технологий в
условиях низких температур**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 12.03.01 2018. 114-248. ВКР

Руководитель проекта, доцент
_____ Д.А. Кацай
_____ 2018 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-475
_____ И.М. Вадутов
_____ 2018 г.

Нормоконтролер, доцент
_____ А.А. Лысова
_____ 2018г.

Челябинск 2018

АННОТАЦИЯ

Вадутов И.М. Разработка датчика давления с применением новых технологий в условиях низких температур. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-475, 2018, 63 с., 20 ил., библиогр. список – 29 наим., 1 – прил.

В работе был произведен анализ технических характеристик различных датчиков, сформирована математическая модель датчика давления, эксплуатируемого в условиях низких температур и рассчитаны требуемые элементы системы с последующим их конструированием.

В ходе выпускной квалификационной работы было использовано программное обеспечение: MS Office 2015, КОМПАС-3D V17 Учебная версия, Mathcad 14.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР			
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Вадутов И.М.			Разработка датчика давления с применением новых технологий в условиях низких температур	Лит.	□□ □□	Листов
Провер.		Кацай Д.А.				4	63	
Реценз.						ЮУрГУ		
Н. Контр.		Лысова А.А.						
Утверд.		Лапин А.П.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР	10
1.1 Анализ технического задания	10
1.2 Анализ сфер применения датчиков	12
1.3 Обзор аналогов	15
1.3.1 Датчик давления МРТ221LT	15
1.3.2 Датчик давления АИР-10SH.....	16
1.3.3 Датчик давления Метран-150.....	18
1.4 Погрешности измерений.....	19
1.5 Сравнительный анализ датчиков давления.....	20
1.6 Формирование математической модели датчика давления, эксплуатируемые в условиях низких температур	20
1.7 Исследование температуры узлов и блоков датчика давлений	24
1.8 Применение аддитивных технологий.....	25
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ	28
2.1 Конструкторские расчёты.....	28
2.1.1 Расчёт упругого элемента	28
2.1.2 Выбор способа гофрировки воспринимающей мембраны	31
2.1.3 Расчёт технологических режимов процессов для установки тензорезисторов	37
2.2 Расчёт геометрических размеров мембраны для установки тензорезисторов	39
2.3 Применение математического моделирования в производстве.....	42
2.4 Моделирование прочности	43
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	45
3.1 Выбор и обоснование выбираемых материалов и конструкций.....	45
3.2 Разработка чувствительного элемента	46

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

3.3 Разработка конструкции датчика и технологический процесс сборки измерительной системы	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	52
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	53
 ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПЕЦИФИКАЦИЯ, СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ, ДЕТАЛИЗАЦИЯ.....	56

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой мирового развития информационных и управляющих систем конца XX – начала XXI века является все более широкое применение во всех сферах жизнедеятельности датчиков разнообразных физических величин (ДФВ). Датчики применяются в промышленном контроле, в автоматизации производственных процессов, в автомобильном, авиационном и железнодорожном транспорте, ракетно-космической и авиационной технике. Особенно велика их роль при измерениях физических величин в экстремальных условиях.

ДФВ становятся основными элементами, определяющими технический уровень и стоимость информационных и управляющих систем. При этом помимо высоких метрологических характеристик ДФВ должны обладать высокой степенью надежности, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением.

В связи со сложностью и трудоемкостью технологического процесса изготовления ДФВ, особую роль в процессе их проектирования приобретают методы математического моделирования, применение которых позволяет существенно сократить сроки и затраты на разработку ДФВ специального назначения.

Приборы для определения давления применяются, практически, во всех отраслях промышленности, особенно в машиностроении, химической, пищевой промышленности и энергетике. Но эти датчики давления не способны применяться в агрессивных средах, в условиях высоких или низких температур.

Проанализированы возможности применения МЭМС-датчиков при добыче и транспортировке нефтепродуктов и в химических отраслях в целях создания измерительных систем, элементы которых работают при температуре ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, в условиях обледенения, погружения в воду, надежных и не требующих обслуживания в процессе эксплуатации.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Основное внимание уделено обработке таких параметров, как: давление, температура, расход, состав измеряемых сред, при этом измерения должны проводиться в непрерывном режиме и в полевых условиях. Показано, что классические методы измерения, основанные на индукционном потенциометрическом методе измерения и использовании стальных упругих элементов, непригодны для работы в районах Крайнего Севера

Поэтому задача построения и исследования математических моделей функционирования датчиков физических величин при воздействии градиентов температур представляется весьма важной и актуальной, особенно в условиях все более усиливающейся автоматизации проектирования и внедрения новых технологий в приборостроении.

Целью данного проекта является разработка конструкции датчика давления с применением аддитивных технологий в условиях низких температур.

Задачами проекта является:

1. Информационный поиск.
2. Принцип действия датчика давления.
3. Математическое моделирование датчика давления для работы в условиях низких температур.
4. Проектирование конструкции датчика давления методом аддитивных технологий.

Вследствие вышесказанного можно сделать вывод, что предложенная тема дипломного проекта является весьма актуальной и востребованной.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

1.1 Анализ технического задания

Исходные данные, используемые в процессе моделирования:

- 1) геометрические размеры элементов конструкции;
- 2) характеристики материалов элементов конструкции;
- 3) характеристики электрических и магнитных материалов (емкость, индуктивность, емкость, коэффициент температуры сопротивления);
- 4) источников энергии (напряжение, частота, мощность).

Переменные параметры в моделировании:

- 1) измеряемая величина - $X(t)$;
- 2) внешние факторы - $f(j)$;
- 3) выходное значение $Y(X, FJ, t)$;
- 4) временные и пространственные координаты.

В процессе моделирования могут быть получены следующие характеристики:

- 1) функции преобразования измеряемой величины в стационарную;
- 2) погрешность нелинейности;
- 3) коэффициент преобразования измеряемой величины;
- 4) динамические характеристики (переходная, импульсная, амплитудная фаза - частота);
- 5) динамическая погрешность;
- 6) прочностные характеристики (поля напряжений и деформаций);
- 7) функции влияния и коэффициенты чувствительности к внешним воздействиям- текущим факторам.

Как отмечалось ранее, проведение сквозного моделирования для любых ДФВ очень проблематично, а в случае с МЭД почти невозможно, из-за не идентичности характера физических процессов, происходящих в различных уровнях. Поэтому более целесообразно проводить моделирование с

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

использованием упрощенного описания объектов моделирования каждого уровня.

Примерами моделирования на уровне ЧЭ могут служить расчеты остатков- термические напряжения, возникающие в трехслойном ЧЭ со структурой: тип ВТ из титана, который зафиксирован к конвертеру ЧС.

Широко используется метод моделирования ЧЭ и сенсорных структур конечных элементов, и на уровне МЭД измерения систем эффективно применение вариационного исчисления [16, с. 89].

При моделировании элементов и структур ДФВ будем руководствоваться следующими ограничениями и данными:

- 1) требования технического задания;
- 2) требования нормативной документации (ГОСТ, ОСТ);
- 3) рекомендации, содержащиеся в научной литературе;
- 4) схема состава МЭД;
- 5) алгоритм моделирования.

Анализ исходных данных и формирование расширенного технического задания:

- 1) диапазон измеряемых давлений от 0.01 до 500 bar;
- 2) выходное напряжение при номинальном давлении не менее 0,5В;
- 3) напряжение питания 10В;
- 4) диапазон рабочих температур от -150 до 50°C;
- 5) частотный диапазон от 0,0 до 2000 Гц;
- 6) нелинейность характеристики $\pm 0.4\%$;
- 7) погрешность в эксплуатационных условиях 0,5-1,0%;
- 8) габаритные размеры 100x30x30 мм.

Определим чувствительность к давлению мембранного преобразователя с мостовой тензорезистивной схемой:

$$S = \frac{U_{\text{вых}}}{E_n \times q},$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

$$S = \frac{500}{10 \times 20.625} = 2.42 \text{ (мВ/кПа*В)};$$

где $U_{\text{вых}}$ -выходное напряжение при номинальном давлении, мВ;

E_n -напряжение питания, В;

$P_{\text{ном}}$ -номинальное давление, кПа;

9) температурный дрейф нуля:

$$dU_{TO} = \frac{dU_{\text{вых}}}{dT} \times \frac{1}{U_{\text{вых.ном}}} \times 100\%$$

Пусть $\pm 0.2\% / 10^{\circ}C$;

10) температурный коэффициент чувствительности датчика:

$$\chi = \frac{dS}{dT} \times \frac{1}{S_o} \times 100\%$$

Пусть $\chi = 0.2\% / \text{град}$;

11) по всей длине полупроводниковых тензорезисторов деформация от воздействия усилия должна быть постоянной;

12) корпус и воспринимающая мембрана должны быть выполнены из материала стойкого к агрессивным средам.

1.2 Анализ сфер применения датчиков

Экстремальные условия эксплуатации датчиков физических величин характерны для таких отраслей науки, техники и технологий, как информационные технические системы, ракетно-космическая техника (РКТ), атомная энергетика. Особенности применения ДФВ в указанных отраслях являются высокие уровни помех, высокие и низкие температуры и прочее, при которых общепромышленные датчики не могут надежно функционировать.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Проведенный анализ задач измерений динамических процессов в ракетно-космической и авиационной технике показал, что датчиковая аппаратура, применяемая для этих целей, подвергается наиболее сосредоточенному и комплексному воздействию дестабилизирующих факторов, таких как: перепады давлений, акустические воздействия, вибрационные и ударные нагрузки, термоудары, термоциклы, агрессивные среды.

Непрерывное усложнение создаваемых аппаратов и объектов для длительных орбитальных полетов, высокая насыщенность их системами диагностики, управления и контроля требуют дальнейшего совершенствования и создания нового поколения ДФВ и сфер применения (Рисунок 1.1).

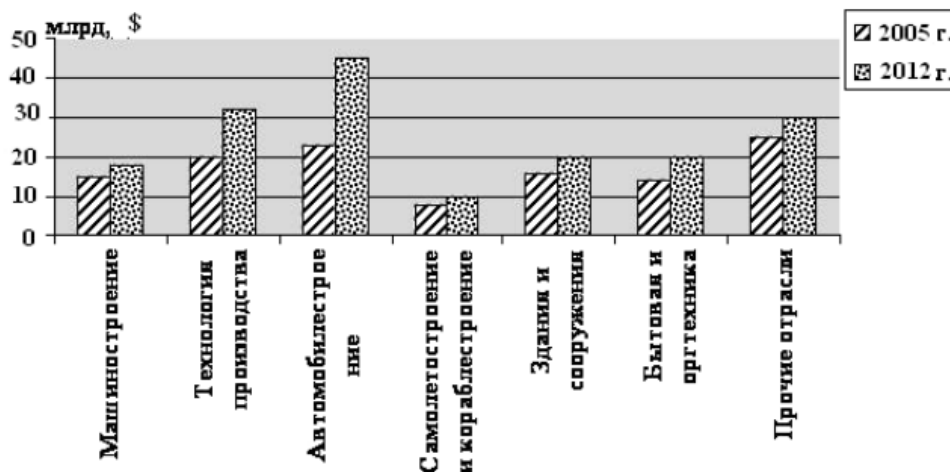


Рисунок 1.1 – Развитие мирового рынка датчиков по областям применения

Другой современной тенденцией в системах управления и диагностики РКТ является разработка методов и средств расширения функциональных возможностей ДФВ. Для общепромышленных датчиков, которые работают в не экстремальных условиях, разработаны схемотехнические методы, которые могут обеспечить высокую точность измерения (0,2...0,5 %) и высокую надежность (более 0,99). В противоположность этому, для ДФВ, предназначенных для РКТ, такие показатели очень трудно выполнить, что связано с критическими режимами функционирования датчиков.

Датчики давления, используемые в специальных областях должны, в отличие от общепромышленных датчиков, должны обладать повышенной устойчивостью к внешним дестабилизирующим факторам (помехам), основными из которых являются вибрации, температура, электромагнитные поля, радиация и проч. Устойчивость к указанным факторам обеспечивается в процессе разработки новых или модернизации существующих ДФВ. Кроме того, так как датчик является метрологическим объектом, то большая часть 19 метрологических характеристик закладывается в его чувствительном элементе (ЧЭ) и измерительном модуле (ИМ), которые необходимо моделировать, чтобы учесть возможные слабые места и возникающие проблемы.

Давление — физическая величина, действующей на единицу площади поверхности и перпендикулярно этой поверхности. В данной точке давление определяется как отношение нормальной составляющей силы F_n , действующей на малый элемент поверхности, к его площади:

$$p = \frac{dF_n}{dS}.$$

Среднее давление по всей поверхности есть отношение нормальной составляющей силы, действующей на данную поверхность, к её площади:

$$p_{\text{ср}} = \frac{F_n}{S}.$$

Давление характеризует состояние сплошной среды и является диагональной компонентой тензора напряжений. В простейшем случае изотропной равновесной неподвижной среды не зависит от ориентации. Является интенсивной физической величиной.

Измерение давления газов и жидкостей выполняется с помощью манометров, дифманометров, вакуумметров, датчиков давления, атмосферного давления — барометрами.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Существует множество различных датчиков давления являющихся наиболее подходящими для конкретного процесса, но их обычно можно разделить на несколько категорий, а именно: упругие датчики, электрические преобразователи, датчики дифференциального давления и датчики давления вакуума. Ниже представлены категории, каждая из которых содержит уникальные внутренние компоненты более подходящие под использование в конкретной ситуации.

1.3 Обзор аналогов

1.3.1 Датчик давления МРТ221LT

Рассмотрим аналоговый модернизированный датчик давления МРТ221LT для суровых условий эксплуатации (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2-Датчик давления МРТ221LT

Он применяется для измерения давлений ультранизкой температуры - 196С до + 125С, таких жидкостей как: жидкий кислород, азот, водород, гелий, также для оценки изменения давлений в охлаждающих резервуарах, криогенных резервуарах, криогенного ракетного топлива и т.д.

Технические характеристики датчика давления МРТ221LT:

Диапазон давлений.....0 - 2000bar
 Рабочее напряжение.....5-15 В (10 В)
 Выходной сигнал.....0-5В, 4-20мА
 Выход полной нагрузки.....100мВ

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

Точность.....3% FS

Рабочая температура.....-196°C до + 125°C

Габаритные размеры датчика МРТ221LT представлены на рисунке 1.3.

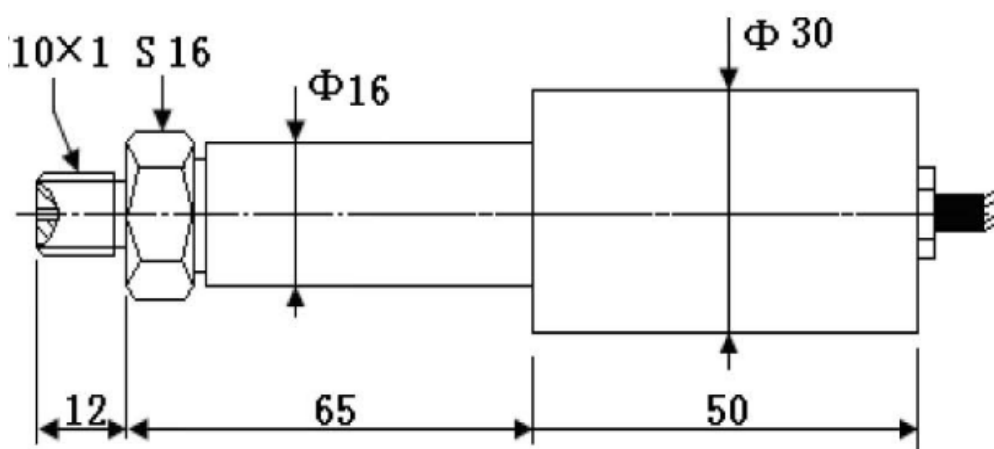


Рисунок 1.3 – Габаритные размеры датчика МРТ221LT

Из недостатков этого датчика можно выделить:

- 1) зарубежный производитель;
- 2) дороговизна продукции.

1.3.2 Датчик давления АИР-10SH

Рассмотрим аналоговый модернизированный датчик давления АИР-10SH (Риснок 1.4) для суровых условий эксплуатации.



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР

Лист

16

Рисунок 1.4 – Датчик давления АИР-10SH

Серия малогабаритных микропроцессорных датчиков давления для измерения давления в суровых условиях эксплуатации. Сохранить высокую достоверность и стабильность измеренных значений давления при воздействии крайне низких температур, контакте с агрессивными средами, в жесткой электромагнитной обстановке и в условиях высокой вибрации на открытых полевых участках без обогрева и укрытия.

Технические характеристики датчика давления АИР-10SH:

Абсолютное давление.....	4 кПа...2,5 Мпа
Выходной сигнал.....	4...20 мА
Погрешность.....	от $\pm 0,1$ %
Рабочая температура.....	-55...+70 °С
Материал.....	Коррозионностойкий корпус

Достоинства датчика АИР-10SH:

1) Работа в суровом климате. Широкий температурный диапазон от минус 60 до +80 °С, высокая степень защиты от пыли и влаги (IP65), низкая дополнительная температурная погрешность (0,08 %/10 °С)

2) Высокая стойкость к агрессивным средам. Большой выбор материалов мембран (нержавеющая сталь 316L, хастеллой, керамика Al2 O3), позволяет применять АИР-10SH для измерения давления в агрессивных средах и нефтепродуктах, включая нефть, мазут, бензин, дизельное топливо. Использование лазерной сварки позволило создать новый конструктив, где сенсор датчика АИР-10SH стыкуется со штуцером прочным сварным соединением. Керамические сенсоры обладают высокой химической и абразивной стойкостью.

3) Вибростойкость. Устойчив к вибрации с частотой до 150 Гц, ускорением до 2 g, с амплитудой смещения до 0,15 мм, что соответствует группе V2 по вибростойкости — (по ГОСТ Р. 52931-2008).

Недостатки датчика АИР-10SH:

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

- 1) маленький диапазон изменения температуры;
- 2) дороговизна продукции;

1.3.3 Датчик давления Метран-150

Диапазон рабочих температур датчика давления Метран-150 (Рисунок 1.5) составляет от -55 до +80°C, а степень защиты от воздействия пыли и влаги – IP 66.



Рисунок 1.5 – Датчик давления Метран – 150

Технические характеристика датчика давления Метран-150:

Диапазон измеряемых давлений.....0-68 МПа
 Выходные сигналы.....4-20 мА
 Погрешность измерений.....±0,2%
 Диапазон температур окружающей среды..... от -55 до 80°C

Достоинства датчика Метран-150:

- 1) минимальные габариты и масса датчика (за счёт наличия только одного фланцевого соединения);
- 2) интегральная сборка, снижающая количество мест утечки и затраты на установку (за счёт отсутствия импульсных линий).
- 3) в моделях, рассчитанных на работу в кислородных и кислородосодержащих средах, в качестве заполняющей жидкости

применяется инертный наполнитель. Модели этого типа подвергаются специальной очистке.

Недостатки датчика Метран-150:

- 1) Малый диапазон температур окружающей среды;
- 2) Малый диапазон давлений;
- 3) Зарубежный производитель.

1.4 Погрешности измерений

При расчете погрешности измерений датчиков давления, необходимо учитывать, что помимо основной погрешности существует дополнительная погрешность.

Основная погрешность – значение погрешности датчика давления относительно диапазона измерений, заявленная заводом изготовителем для нормальных условий эксплуатации. Как правило, под условиями эксплуатации понимают следующие условия:

1. Температура окружающей и рабочей среды до – 150 °С;
2. Давление рабочей среды – в пределах диапазона измерений датчика;
3. Нормальное атмосферное давление;
4. Отсутствие турбулентности потока или других явлений, в месте установки датчика, способных повлиять на показания.

Дополнительная погрешность — значение погрешности, вызванное отклонением условий эксплуатации от нормальных, ввиду особенностей данного конкретного применения. Одной из основных составляющих дополнительной погрешности является температурная погрешность, которая указывается в технической документации к датчикам давления и может быть рассчитана для конкретного значения температуры рабочей среды.

Также дополнительную погрешность может вызывать турбулентность потока измеряемой среды, изменение плотности среды при гидростатическом измерении уровня, динамические нагрузки на оборудование во время

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

перемещения в пространстве (судна, транспорт и т. д.) и другие возможные факторы.

При расчете погрешности измерительной системы в целом нужно также учитывать класс точности измерительного прибора — индикатора.

1.5 Сравнительный анализ датчиков давления

Работу по выбору датчиков давления нужно начинать с получения информации о выпускаемых изделиях (каталоги, периодические издания). Далее провести предварительный отбор подходящих образцов, при этом особое внимание необходимо обращать на эксплуатационные характеристики, т.к. данные требования должны быть выполнены в обязательном порядке.

Основные свойства средства измерения определяются видом измеряемого давления (абсолютное, избыточное и дифференциальное разность давления), диапазоном измерения, диапазоном рабочих температур, погрешностью измерения и декларированной ее временной стабильностью, типом интерфейса входного сигнала.

Фактом подтверждения устойчивости датчиков к внешним воздействиям является проведение соответствующих испытаний по программам и методикам в соответствии с принятыми отраслевыми или международными стандартами. При этом временную стабильность можно оценить только по результатам длительных эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ). Проведение ЭЦИ показывает близкий к реальности процесс воздействия дестабилизирующих факторов на работу датчика.

1.6 Формирование математической модели датчика давления, эксплуатируемые в условиях низких температур

В силу большой сложности (нестационарность, необходимость учета различных видов теплообмена, наличие несимметричных источников тепла, разнородная многокомпонентная структура, особенности крепления и условий теплообмена с внешней средой, взаимосвязанность физических

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

процессов и т.п.) задача расчета температурного поля рассматриваемого датчика давления может быть решена путем применения численных методов.

В настоящей работе для расчета неоднородных трехмерных нестационарных температурных полей датчиков физических величин предлагается использовать приближенный численный метод. Основной алгоритм расчета температурного поля, полученный на основе метода тепловых балансов и принятых допущений для рассматриваемого типа датчиков, состоящих из твердотельных элементарных объемов, имеет следующий вид:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[1 - \frac{\Delta t}{c_i} (\sum_{j=1}^M q_{ij} + q_{ic}) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} (\sum_{j=1}^M q_{ij} T_j + q_{ic} T_c + Q_i) \quad (1)$$

где $T_i(t)$, $T_i(t+\Delta t)$ – температура i -го объема соответственно в настоящий и последующий моменты времени;

c_i - теплоемкость;

q_{ij} – теплопроводимость между объемами

i, j, q_{ic} – теплопроводимость между i -м объемом и окружающей или измеряемой средой;

Q_i – мощность источников или стоков тепла;

Δt – шаг расчета;

M – число объемов, имеющих тепловой контакт с i -м объемом;

N – число объемов; $i = 1, \dots, N$.

Суммарная тепловая проводимость, характеризующаяся входящими в (1) коэффициентами теплопроводимости q_{ij} , может быть представлена в виде:

$$q_{ij} = q_T + q_K + q_{и} = a_T f_T + a_K f_K + a_{и} f_{и}$$

где $q_T, q_K, q_{и}$ – коэффициенты теплопроводимости;

$a_T, a_K, a_{и}$ – функции теплофизических и геометрических параметров объемов;

									Лист
									21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР				

$f_T, f_K, f_{и}$ – температурные функции.

Предложенный способ расчета позволяет учитывать основные виды теплообмена, имеющие место в рассматриваемом датчике. К формулам необходимо добавить начальные условия, и задача сведется к определению функций $T_i(t)$ по всем элементарным объемам в каждый момент времени. Таким образом, построенные и реализованные в программных комплексах алгоритмы и формулы составляют основу математической модели тепловых процессов в датчике давления и позволяют рассчитывать и проводить анализ температурных полей.

Ценность любой построенной математической модели определяется точностью, с которой эти модели отражают физические (в данном случае тепловые) процессы в конструкции датчика давления. Вопрос о погрешностях предложенного метода расчета может быть получен из сравнения рассчитанных полей температур на основе построенной модели.

Исследования были проведены с различной степенью детализации, обусловленной наличием теоретических и экспериментальных данных по тепловым испытаниям, для всех основных типов датчиков. Как показали проведенные исследования, результаты математического моделирования полностью отражают характер и особенности тепловых процессов в рассмотренном типе датчика. Средние квадратические погрешности расчетных и экспериментальных данных носят нормальный характер и при числе расчетных точек по объему прибора порядка нескольких сотен не превышают 10% в нестационарных режимах и единиц процентов в установившихся температурных режимах.

На рисунке 1.6 представлена компоновка датчика давления и ее последующим

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

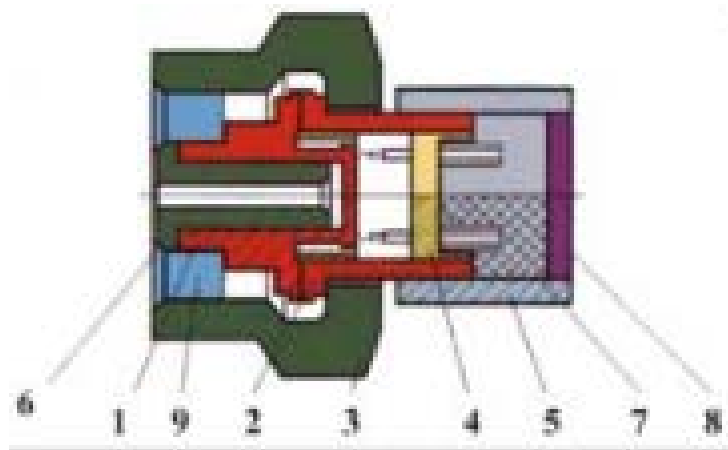


Рисунок 1.6 - Компоновка датчика

Разбиение датчика давления на элементарные объемы (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Тепловая модель с разбиением на элементарные объемы датчика давления:

1 – воспламеняющий элемент с мембранной (объемы 1-12); 2 – корпус внутренний (13-18); 3 – гайка накидная (19-23); 4 – колодка контактная (24-29); 5 – корпус наружный (30-34); 6 – втулка (35-40); 7 – наполнитель-клей (41-48); 8 – крышка (49-51); 9 – штуцер (52)

Тепловая модель рассматриваемого типа датчика состоит в том, что он разбивается на конечные твердотельные элементарные объемы, имеющие каноническую форму кольцевых или сплошных цилиндров. Эти элементарные объемы имеют теплофизические и геометрические характеристики и тепловые связи, соответствующие реальной конструкции. Число элементарных объемов данной тепловой модели (расчетных точек, в

каждой из которых определяется температурное поле с течением времени) равно 52.

1.7 Исследование температуры узлов и блоков датчика давлений

В случае моделирования датчиков давления переменные представляют собой параметры физических эффектов, составляющих принцип действия датчика, параметры внешней среды, где будет использоваться датчик, а также другие параметры, которые необходимы для оценки.

Уравнения связи представляют собой собственно математическую модель датчика. Они выписываются при анализе задачи моделирования, исходя из моделей отдельных эффектов, критериев и ограничений, при этом ограничения необходимы для более детального описания датчика, а критерии описывают цели моделирования.

Методика моделирования

Построение математической модели датчика можно условно разделить на следующие этапы:

- физический анализ датчика;
- анализ задачи моделирования;
- собственно моделирование.

На первом этапе определяется структура принципа действия датчика. Выявляются эффекты, реализующие датчик, их взаимосвязи.

На втором этапе анализируется цепь построения модели. Определяются показатели датчика, которые должны быть рассчитаны, переменные от которых эти показатели зависят. Выявляется связь между различными переменными в будущей модели.

На третьем этапе составляется модель. Здесь выписываются все существенные для решаемых задач переменные (выявленные на предыдущем этапе) и связываются между собой соответствующими зависимостями.

Создание ММ требует наличия определенной цепочки принципа действия и структурной схемы, визуально поясняющих преобразование некоторого

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

исходного или начального состояния (давления) в электрический сигнал (Рисунок 1.8).

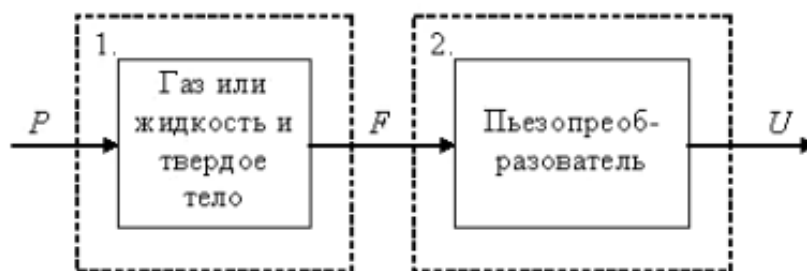


Рисунок 1.8 – Структурная схема преобразования давления:

1 – блок преобразования $P \rightarrow F$; 2 – блок преобразования $F \rightarrow U$

Физическая сущность выбранного принципа действия заключается в том, что газ или жидкость действует на твердое тело и при этом оно испытывает некоторое усилие. Это усилие передается другому телу, вызывая появление выходного электрического сигнала.

Рассмотренная структурная модель преобразована в структурную схему датчика давления (Рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Структурная схема датчика давления

Согласно структурной схеме измеряемое давление воспринимается мембраной и передается через силопередающую прокладку на рабочую секцию пьезомодуля. Под действием механического напряжения на гранях пьезомодуля возникают поверхностные электрические заряды.

1.8 Применение аддитивных технологий

Аддитивные технологии широко применяются в энергетике, приборостроении, авиационной промышленности, космической

промышленности, где существует высокий спрос на продукцию сложной геометрии.

В России многие предприятия уже знакомы с аддитивными технологиями. Наличие аддитивной технологии позволяет наладить производство необходимых деталей на собственных площадках, устраняя посредников, поставщиков, риски доставки и снижая себестоимость продукции.

Понятно, что с учетом цены материала, стоимость таких инженерных работ очень высока. Но можно сделать это практически без потери материала и сразу вырастить этот продукт.

Популярность аддитивных технологий неуклонно растет. Хотя общий объем мирового рынка относительно невелик (около \$ 6 млрд), годовой темп роста не может не впечатлить – в среднем 20-30%. Однако до сих пор нет единого мнения в оценке роли аддитивных технологий в отрасли: одни говорят, что внедрение методов 3D-печати приведет к упадку отрасли в традиционном понимании, другие – что трехмерные принтеры станут лишь одним из элементов производственных схем. Но, несмотря на все существующие различия, большие перспективы аддитивных технологий в отрасли отрицать нельзя.

Прямое выращивание продуктов со сложной геометрией и специфическими материалами очень выгодно с экономической точки зрения. Это экономит материал, время, снижает риск возникновения ошибок. 3D принтеры перестали быть "дорогой игрушкой", сегодня они занимают полноценное место среди ключевых технологий.

Преимущества аддитивных технологий:

1) улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки;

2) большая экономия сырья. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80-85%;

3) возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (этого не получить ни литьем, ни штамповкой);

4) мобильность производства и ускорение обмена данными. Никаких чертежей и замеров. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира — и сразу начать производство.

Вывод по разделу: был проведен информационный поиск, в связи с которым были выделены различные достоинства и недостатки современных датчиков давления. Датчики давления широко используются в системах управления, контроля и регулирования различных систем и агрегатов ракетоносителей, турбореактивных двигателей, пассажирских и военных самолетах. В связи с этим они должны обладать повышенной устойчивостью к помехам, основными из которых являются вибрация и температура. Рассмотрен расчет математической модели тепловых процессов датчика давления и тепловая модель с разбиением на элементарные объемы. Произведено математическое моделирование узлов и блоков датчика давлений, построены структурные схемы.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

2.1 Конструкторские расчёты

2.1.1 Расчёт упругого элемента

На схему подаётся стабилизированное напряжение питания $E_n=10$ В, тогда при приведённых величинах сопротивления на диагонали моста будет подаваться напряжение:

$$U_n = 0.6 \times 10 = 6B$$

1) деформацию ε_n одного тензорезистора при номинальной нагрузке, когда все 4 плеча моста активны, можно определить по следующей формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{k} \times \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{k} \times \frac{U_{6bIx}}{U_n}$$
$$\varepsilon_n = \frac{1}{120} \times \frac{0.5}{6} = 6.9 \times 10^{-4}$$

Напряжение моста должно быть больше на 12%, поэтому:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{120} \times \frac{0.56}{6} = 7.8 \times 10^{-4}$$

2) в качестве упругого элемента будем использовать плоскую квадратную мембрану. Форма упругого элемента зависит от ориентации монокристалла. В нашем случае [1-1-0]. Сторону квадрата примем равной 2 мм.

При выборе радиуса мембраны необходимо учитывать следующие ограничения:

1) следует проверить соотношение между толщиной и радиусом мембраны. Для плоской мембраны должно выполняться соотношение:

$$r_a \geq 15 \cdot h$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

2) слишком тонкая мембрана механически менее прочна по сравнению с более толстой и может иметь большую погрешность изготовления (по толщине);

3) меньший радиус мембраны предпочтительнее с точки зрения возможности получения большего количества мембран и так же с точки зрения ее меньшей стоимости.

Типичные значения радиуса кремниевой мембраны лежат в пределах $0,5 \cdot 10^{-3} - 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, а толщины – $10 \cdot 10^{-6} - 100 \cdot 10^{-6}$ м.

3) Связь относительной деформации тензорезистора, расположенного на плоской мембране, с внешним давлением, воздействующим на плоскую мембрану, выражается соотношением:

$$\varepsilon_n \cdot E = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{r_a}{h} \right)^2 \cdot p'$$

где ε_n - относительная деформация тензорезистора, расположенного на плоской круглой мембране;

E - модуль упругости (модуль Юнга) материала мембраны для кристаллографической ориентации (для нашего случая $E=1,15 \cdot 10^6$, Па);

r_a - радиус плоской круглой мембраны, м;

h - толщина плоской круглой мембраны, м;

p' - эффективное давление, воздействующее на кремниевую мембрану (составляет 98-99% от давления, воздействующего на датчик, что связано с потерями на вязкое трение в несжимаемой жидкости и о стенки межмембранной полости), Па.

4) С учетом приведённых выше выражений толщина кремниевой мембраны, обеспечивающая необходимую деформацию тензорезисторов (а значит и необходимый уровень выходного сигнала преобразователя) при воздействии номинального давления будет высчитываться по следующей формуле:

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

$$h = \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{P_{НОМ}}{E} \cdot \varepsilon_n \cdot r_a}, \text{ мм}$$

$$h = 2 \times \sqrt{\frac{3 \times 0.0004}{4 \times 1.9 \times 10^4 \times 7.8 \times 10^{-4}}} = 0.004$$

5) прогиб центра кремниевой мембраны под воздействием на нее номинального эффективного давления:

$$\omega_B(0) = \frac{3}{16} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{r_a^4 \cdot P_{НОМ}}{h^3 \cdot E},$$

где ν -коэффициент Пуассона ($\nu=0,184$).

$$\omega_B(0) = \frac{3}{16} \times (1 - 0.184) \times \frac{2^2 \times 0.004}{0.4^3 \times 1.9 \times 10^4} = 0.0000131 \text{ мм}$$

6) Объем, который заполнится несжимаемой жидкостью при прогибе мембраны под воздействием номинального эффективного давления:

$$V = \frac{\pi \cdot r_a^2 \cdot \omega_B(0)}{2},$$

$$V = \frac{3.14 \times 4 \times 0.0000131}{2} = 0.000082 \text{ мм}^3$$

8) Т.к. полость между кремниевой мембраной и разделительной металлической гофрированной мембраной заполнена несжимаемой жидкостью, то прогиб центра разделительной металлической гофрированной мембраны под воздействием номинального эффективного давления может быть найден из равенства вытесняемых объемов обеими мембранами:

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

$$W_B^{HOM}(0) = \frac{2 \cdot V}{\pi \cdot R_a^2},$$

где R_a - радиус разделительной металлической гофрированной мембраны (выбирается из анализа исходных данных, а именно габаритных размеров датчика). Для нашего случая примем $R_a=30$ мм.

$$W_B^{ном} = \frac{2 \times 0,76}{3,14 \times 30^2} = 5,3 \times 10^{-4}, \text{ мм}$$

2.1.2 Выбор способа гофрировки воспринимающей мембраны

Для каждого варианта конструкции металлической мембраны рассчитывается эквивалентное давление для максимальной величины (при воздействии номинального эффективного давления) прогиба металлической мембраны:

$$P_{ЭКВ} = \frac{E_M \cdot h_M^4}{R_a^4} \left(a \frac{W_B^{HOM}(0)}{h_M} + b \frac{(W_B^{HOM}(0))^3}{h_M^3} \right), \text{ Па} \quad (2)$$

где E_M - модуль упругости материала металлической мембраны, Па;

h_M - толщина металлической мембраны, м;

a, b - коэффициенты, зависящие от параметров гофрировки мембраны:

$$a = \frac{2 \cdot (3 + \alpha) \cdot (1 + \alpha)}{3 \cdot k_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\mu}{\alpha} \right)^2 \right]} \times \eta$$

$$b = \frac{32 \cdot k_1}{\alpha^2 - 9} \cdot \left(\frac{1}{6} - \frac{3 - \mu}{(3 + \alpha) \cdot (\alpha - \mu)} \right) \times \xi$$

$$\alpha^2 = k_1 \cdot k_2 \quad (3)$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

где k_1, k_2 - коэффициенты, зависящие от профиля гофрированной мембраны, определяемые из таблицы 1.

μ - коэффициент Пуассона материала металлической гофрированной мембраны.

η, ξ - поправочные коэффициенты гофрировки, зависящие от относительного радиуса жёсткого центра и α .

1) Рассмотрим вариант конструкции мембраны с пологим синусоидальным профилем (Рисунок 2.1).

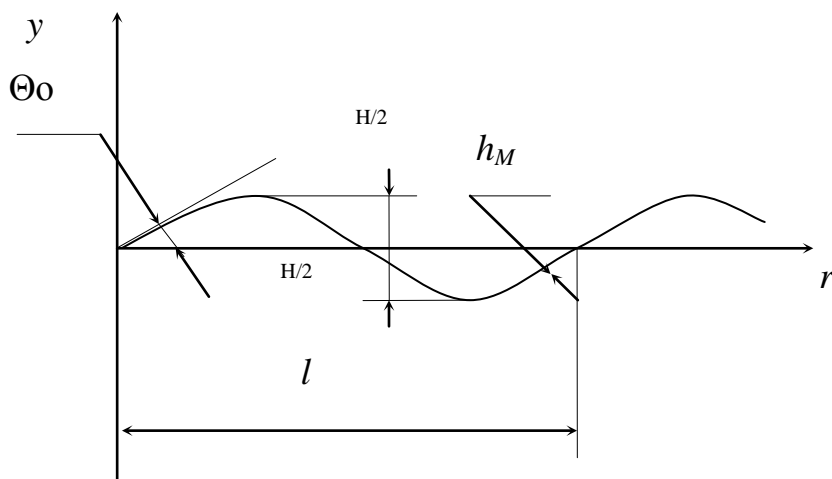


Рисунок 2.1 – График конструкции мембраны с пологим синусоидальным профилем

Самостоятельно выбираем параметры гофрировки:

$H = 1$ мм - глубина гофрировки;

$h_m = 0,15$ мм-толщина металлической мембраны;

Рассчитываем коэффициенты гофрировки:

$$k_1 = 1;$$

$$k_2 = \frac{3 \times 1^2}{2 \times 0.15^2} + 1 = 67.6;$$

Рассчитываем α по формуле (3):

$$\alpha = \sqrt{1 \times 67.6} = 8.23$$

Т.к. в нашем датчике в центре гофрированной мембраны будет использоваться жёсткий центр, то рассчитываем относительный радиус жёсткого центра:

$$\rho_0 = \frac{r}{R_a},$$

где r - радиус жёсткого центра, мм.

$$\rho_0 = \frac{6}{30} = 0.2$$

Выбираем поправочные коэффициенты параметров гофрировки (из методических указаний в электронном виде):

$$\eta = 1$$

$$\xi = 1.07$$

Далее рассчитываем коэффициенты a и b зависящие от параметров гофрировки:

$$a = \frac{2 \times (8.23 + 3) \times (1 + 8.23)}{3 \times 1 \times \left[1 - \left(\frac{0.184}{8.23} \right)^2 \right]} \times 1 = 71.48$$

$$b = \frac{32 \times 1}{8.23^2 - 9} \times \left(\frac{1}{6} - \frac{3 - 0.184}{(8.23 + 3) \times (8.23 - 0.184)} \right) \times 1.07 = 0.079$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

Теперь у нас есть все данные для расчёта $p_{ЭКВ}$ по формуле (2):

$$p_{ЭКВ} = \frac{195 \times 10^9 \times 0.15^4}{30^4} \times \left(71.48 \times \frac{5.3 \times 10^{-4}}{0.15} + 0.079 \frac{(5.3 \times 10^{-4})^3}{0.15^3} \right) = 30.8 \text{ (Па)}$$

Для анализа и выбора оптимальной конструкции металлической гофрированной мембраны построим график зависимости эквивалентного давления от прогибов центра металлической мембраны (Рисунок 2.2)

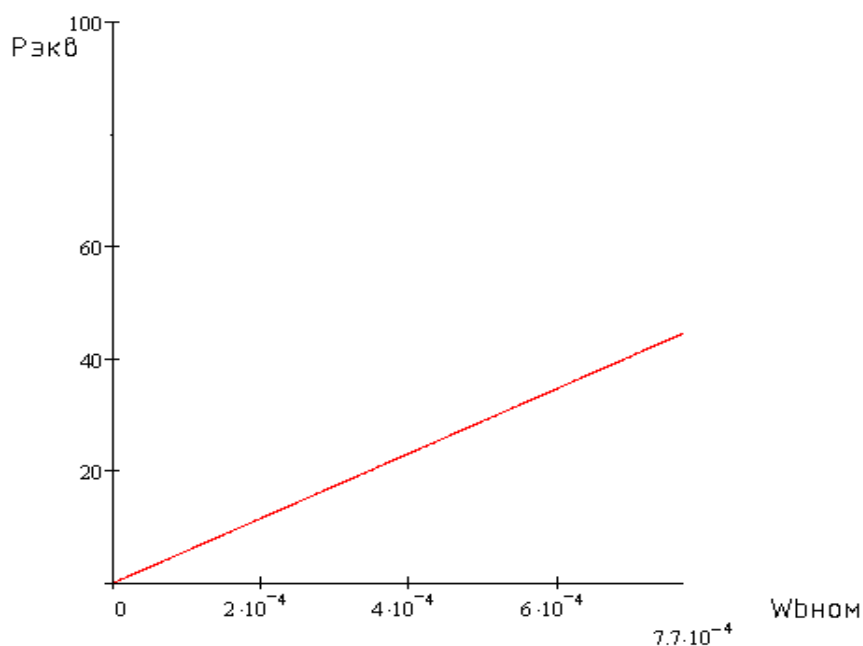


Рисунок 2.2 - Упругая характеристика мембраны

2) Рассмотрим вариант конструкции мембраны с пильчатым профилем гофрировки (Рисунок 2.3).

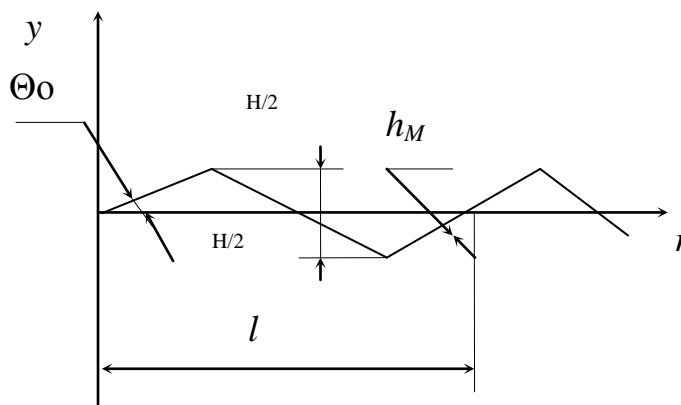


Рисунок 2.3 - Конструкция мембраны с пильчатым профилем гофрировки

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

Самостоятельно выбираем параметры гофрировки:

$H = 1\text{ мм}$ - глубина гофрировки;

$h_m = 0,15\text{ мм}$ - толщина металлической мембраны;

$\theta_0 = 15^\circ$ - угол наклона гофрировки;

Рассчитываем коэффициенты гофрировки:

$$k_1 = \frac{1}{\cos 15^\circ} = 0.97$$

$$k_2 = \frac{1^2}{0.97 \times 0.15^2} + 0.97 = 46.4$$

$$\alpha = \sqrt{46.4 \times 1.031} = 7$$

Выбираем поправочные коэффициенты:

$$\eta = 1.015$$

$$\xi = 1.075$$

Далее рассчитываем коэффициенты a и b зависящие от параметров гофрировки:

$$a = \frac{2 \times (7 + 3) \times (1 + 7)}{3 \times 0.97 \times \left[1 - \left(\frac{0.184}{7} \right)^2 \right]} \times 1.015 = 12.5$$

$$b = \frac{32 \times 0.97}{7^2 - 9} \times \left(\frac{1}{6} - \frac{3 - 0.184}{(7 + 3) \times (7 - 0.184)} \right) \times 1.07 = 0.098$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

Теперь у нас есть все данные для расчёта $p_{ЭКВ}$ по формуле (2):

$$p_{ЭКВ} = \frac{195 \times 10^9 \times 0.15^4}{30^4} \times \left(12.37 \times \frac{5.3 \times 10^{-4}}{0.15} + 0.098 \frac{(5.3 \times 10^{-4})^3}{0.15^3} \right) = 5.3$$

Для анализа и выбора оптимальной конструкции металлической гофрированной мембраны построим график зависимости эквивалентного давления от прогибов центра металлической мембраны (Рисунок 2.4).

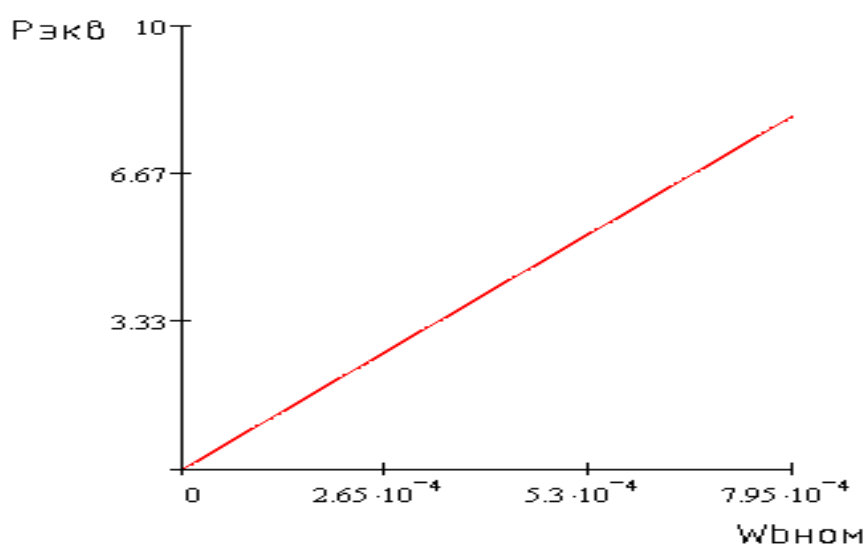


Рисунок 2.4 - График зависимости эквивалентного давления от прогибов центра металлической мембраны

Из графиков видно, что зависимость эквивалентного давления от величины прогибов металлической мембраны практически полностью линейна, а значит линейным будет и упругая характеристика $W_B(0) = f(P_{ЭКВ})$.

Проанализировав полученные данные приходим к выводу, что в проектируемом нами датчике необходимо использовать пильчатый профиль гофрировки воспринимающей металлической мембраны.

2.1.3 Расчёт технологических режимов процессов для установки тензорезисторов

Для формирования тензорезисторов будем проводить диффузию бора в две стадии: загонки и разгонки.

Исходные данные для проведения загонки бора выбираются согласно известной методике: $T_1=1000^\circ\text{C}$, $N_s=2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $D_1=5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$, $t=10$ мин.

Рассчитаем количество примеси при загонке:

$$Q = 2N_s \cdot \sqrt{\frac{D_1 \cdot t_1}{\pi}},$$

где N_s – поверхностная концентрация при температуре загонки, см^{-3} ;

D_1 – коэффициент диффузии при загонке, определяется по графику с учетом температуры, $\text{см}^2/\text{с}$;

t_1 – время загонки, с.

$$Q = 2 \cdot 2 \cdot 10^{20} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-14} \cdot 600}{3.14}} = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Для проведения разгонки бора выбираем температуру $T_2=1150^\circ\text{C}$ и время $t_2=40$ мин.

Коэффициент диффузии при разгонке определяется по графику с учетом температуры и равен $D_2=6 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$.

Условием образования р-п перехода является равенство концентраций примеси в исходной подложке N_0 и примеси $N(x, t)$, полученной в результате разгонки. Из этого условия можно определить глубину залегания р-п перехода

$$N_0 = N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D_2 \cdot t_2}} \cdot \exp\left(-\frac{X_j^2}{4 \cdot D_2 \cdot t_2}\right),$$

где D_2 – коэффициент диффузии при разгонке, $\text{см}^2/\text{с}$;

t_2 – время разгонки, с;

N_o – концентрация примеси в пластине, см^{-3} ;

X_j – глубина залегания р-п перехода, см.

Концентрацию примеси в пластине рассчитаем по формуле:

$$N_o = \frac{1}{e \cdot \mu_n \cdot \rho},$$

$$N_o = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1450 \cdot 4.5} = 9.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

где e – заряд электрона, $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

μ_n – подвижность электронов ($1450 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$);

ρ – удельное сопротивление материала пластины, $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Определим глубину залегания р-п перехода:

$$X_j = 2 \cdot \sqrt{D_2 \cdot t_2 \cdot \ln(N'_s / N_o)},$$

$$N'_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D_2 \cdot t_2}}.$$

$$N'_s = \frac{1.2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3.14 \cdot 6 \cdot 10^{-15} \cdot 2400}} = 1.84 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

$$X_j = 2 \cdot \sqrt{6 \cdot 10^{-13} \cdot 2400 \ln \frac{1.84 \cdot 10^{19}}{9.5 \cdot 10^{14}}} = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Для расчета поверхностного сопротивления воспользуемся номограммой для определения проводимостей полупроводниковых областей, полученных

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

диффузией акцепторной примеси. Номограммы позволяют найти усредненную удельную объемную проводимость σ резистивного слоя в зависимости от поверхностной концентрации примесей N'_s , концентрации примесей в исходном материале (эпитаксиальном слое) N_0 и глубины p-n перехода X_j .

В данном случае проводимость равна $\sigma=70 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$.

Расчётам удельное сопротивление квадрата резистивного слоя:

$$\rho_0 = \frac{1}{X_j \cdot \sigma} = \frac{1}{70 \cdot 2.4 \cdot 10^{-4}} = 60$$

Удельное сопротивление будет равным 60 Ом

2.2 Расчёт геометрических размеров мембраны для установки тензорезисторов

На рисунке 2.5 показан тензорезистор:

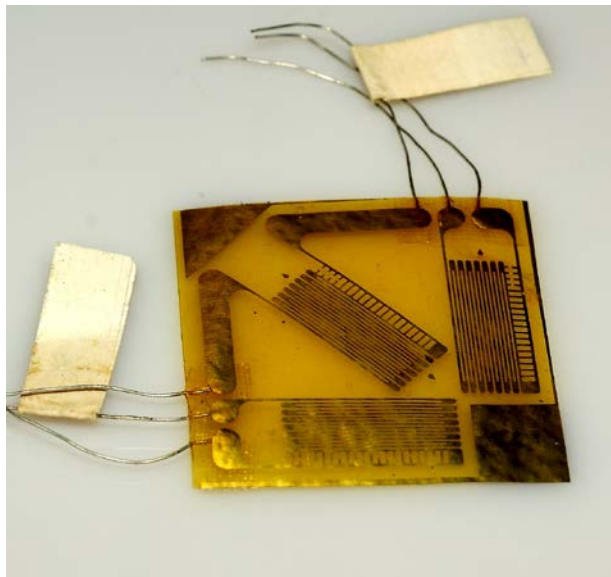


Рисунок 2.5- Тензорезистор

Определим ширину тензорезисторов:

$$B_{\text{расч}} \geq \max \{ B_{\text{тех}}, B_{\text{точн}}, B_p \},$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

где $B_{\text{тех}}$ – минимальная ширина резистора, определяемая разрешающей способностью технологических процессов, $B_{\text{тех}}=4$ мкм;

$B_{\text{точн}}$ – минимальная ширина резистора, при которой точность его изготовления равна заданной;

B_p – минимальная ширина резистора, определяемая максимально допустимой рассеиваемой мощностью.

$$B_{\text{точн}} = \Delta B \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\rho_0}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}},$$

где ΔB – абсолютная погрешность ширины резистивной полоски, обусловленная в основном процессами литографии.

Для типовых технологических процессов можно принимать $\Delta B = \pm 0,4$ мкм, $\Delta R/R = \pm 10\%$.

$$B_p = \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot P}{R \cdot P_0}},$$

где P_0 – максимально допустимая мощность рассеивания, выбирается в зависимости от типа корпуса микросхемы и условий ее эксплуатации в пределах $0,5 \dots 4,5$ Вт/мм², в данном случае $P_0 = 4,5$ Вт/мм²;

Минимальная ширина резистора B_p определяется исходя из максимально допустимой рассеиваемой мощности по формуле:

$$B_p = \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot P}{R \cdot P_0}},$$

где P_o – максимально допустимая мощность рассеивания, выбирается в зависимости от типа корпуса микросхемы и условий ее эксплуатации в пределах $0.5 \div 4.5$ Вт/мм², в данном случае $P_o=4.5$ Вт/мм²;

P – средняя мощность, рассеиваемая резистором.

$$P = \frac{U_n^2}{R} = \frac{3.6^2}{500} = 0.026 \text{ Вт.}$$
$$B_p = \sqrt{\frac{60 \cdot 0.026}{500 \cdot 4.5}} = 26.3 \text{ мкм.}$$

Таким образом, ширина резистора должна быть не менее 27 мкм.
Рассчитаем ширину резистора на фотошаблоне:

$$B = B_p - 2 \cdot (k \cdot d_{ок} + a \cdot h_o),$$

где $d_{ок}$ – толщина маскирующего слоя, равна 0,5 мкм;

a – коэффициент, учитывающий боковую диффузию, равный 0.8 мкм;

k – коэффициент, связывающий боковое подтравливание маскирующего окисла с его толщиной, равный 0.85 мкм;

h_o – толщина резистивного слоя, равная глубине залегания р-п перехода 2.4 мкм.

Вычислим ширину резистора на фотошаблоне:

$$B=27-2 \cdot (0.85 \cdot 0.5+0.8 \cdot 2.4) = 22.3 \text{ мкм.}$$

Принимаем ширину резистора на фотошаблоне равной 23 мкм.

Длина резистора на фотошаблоне:

$$I = B \cdot K_\phi,$$

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

где K_ϕ – коэффициент формы, который находится из выражения

$$R = \rho_o \cdot (K_\phi + 2K_p),$$

где K_p – коэффициент, учитывающий растекание тока в контакте и равен 0.65 для контактов сложной конфигурации.

Коэффициент формы:

$$K_\phi = \frac{R - \rho_o \cdot 2K_p}{\rho_o} = \frac{500 - 60 \cdot 2 \cdot 0.65}{60} = 7.03.$$

Находим длину резистора на фотошаблоне $I = 23 \cdot 7.03 = 161.69 \approx 162$ мкм.

Длина резистора на кристалле:

$$I_p = B_p \cdot K_\phi.$$

$$I_p = 27 \cdot 7.03 = 189.8 \text{ мкм.}$$

Примем $I_p = 190$ мкм.

Для разработки фотошаблонов и топологического чертежа будем учитывать, что размеры контактного окна 4x4 мкм, размеры внешних контактных площадок 75x75 мкм.

2.3 Применение математического моделирования в производстве

На практике проектирование, технология и развитие производства происходит с помощью модернизации. Выпуская приборы, нередко сталкиваются с факторы неоднозначности, сложности реальных жизненных процессов, циклов разрабатываемых изделий.

Невозможно учесть все влияющие факторы в этом случае коэффициенты, следовательно, ранее полученные при стохастическом

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

моделировании модели устройств часто имеют недостаточную сходимость и данные.

В то же время сложно создавать точные модели, а зачастую и нецелевые по экономическим причинам.

Приемлемый компромисс между вышеизложенным модель, которая включает в себя специалистов, может служить образцами - вытекающими из накопленных экспериментальных данных и знаний специалистов (экспертов) в рассматриваемой области, в данном случае в области разработки датчиков.

Данные методы и модели, включают опыт разработчиков, технологов, чрезвычайно популярны в симуляции.

Экспертные методы моделирования и созданные в процессе моделирования экспертные модели позволяют производить расчеты с приемлемой точностью, не прибегая к дорогостоящему, зачастую сложному в освоении, специализированному компьютеру.

При этом наиболее подходящими и востребованными на практике являются численные методы математического моделирования и алгоритмы их основ. Такие методы и модели в полной мере используют экспертные методы. Которые проявляются, например, в установлении начальных условий в дифференциальных уравнениях, функций различных коэффициентов в уравнениях.

2.4 Моделирование прочности

Толщина деформируемой части чувствительного элемента является наиболее важным параметром, так как определяет чувствительность, линейного преобразования и геометрических размеров зонда.

Технология жидкостного анизотропного травления, позволяет получить очень тонкие УЭ, чем достигается увеличение чувствительности от мощности дозы, при сохранении постоянных посадочных размеров. Или, наоборот, чувствительность преобразования может быть постоянной, но его геометрический размер может быть уменьшен.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Поэтому, используя типичную топологию схемы датчика, можно получить ряд ЧЭ и ИМ на различных рядах измеренного значения путем измерения не только толщины УЭ, но и его размера [13].

Не похожие на обычные интегральные схемы, ПЧЭ на распространении характеристик МЭД, в дополнение к обычным технологическим факторам, имеет ряд дополнительных факторов, в частности, рассеивание геометрических размеров датчика УЭ, который может достигать нескольких десятков процентов. Отсюда становится очевидным, что контроль и воспроизводимость толщины УЭ очень важны для того чтобы уменьшить время функции преобразования.

Упругие свойства изотропных тел при объемном механическом напряжении определяются тремя параметрами: модулем Юнга Y , коэффициентом- Пуассоновским объемом ν и модулем сдвига G . Два из них независимы, а третий выражен через них однозначно. Для анизотропных материалов, которые включают все полупроводники, упругие свойства определяются множеством гораздо больших количеств физических факторов.

Поскольку кремний является анизотропным материалом, очевидно, что значения этих модулей не будут постоянными, а будут зависеть от выбранного направления в кристалле.

В практике создания наиболее распространены ориентации плоскости кремниевых пластин: (111), (100) и (110).

Вывод по разделу: был произведен расчет прогиба мембраны, выбор способа гофрировки мембраны, рассчитали геометрические размеры мембраны для установки тензорезисторов. Так же рассмотрено применение математического моделирования в производстве, произведено моделирование прочности.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

3.1 Выбор и обоснование выбираемых материалов и конструкций

При проектировании любой конструкции особое внимание следует уделить материалу, из которого будет изготовлено устройство. В нашем случае к материалу предъявляются очень жесткие требования из-за условий, в которых теоретически придется работать нашему датчику. Поэтому необходимо выполнить несколько условий.

Материал должен быть:

- Химически устойчивый к некоторым типам влияний;
- Иметь достаточную прочность;
- Хорошо обработанный;

Материал, из которого мы будем изготавливать датчик давления выберем титановый сплав Ti6Al4V (ГОСТ ИСО 5832-3) [19]. Из этого материала мы выполним как чувствительный элемент, так и мембрану датчика.

Технические характеристики сплава Ti6Al4V

Предел текучести R_e900 - 1200
Н/мм²

Предел прочности на разрыв R_m 1100 - 1300
Н/мм²

Модуль Юнга..... 110×10^3 Н/мм²

Теплопроводность..... $\lambda 7$ Вт/м*К

Коэффициент термического расширения..... 9×10^{-6} К⁻¹

Сплав отлично подходит под нашу конструкцию т.к. обладает следующими свойствами:

- 1) лёгкость материала;
- 2) высокая прочность в широком интервале температур от -250 °С;
- 3) коррозионная стойкость к агрессивным средам;

4) высокая прочность при низкой плотности.

3.2 Разработка чувствительного элемента

3D-модель датчика давления изображена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Модель датчика давления

Рассмотрим общий вид в разрезе (Рисунок 3.2)

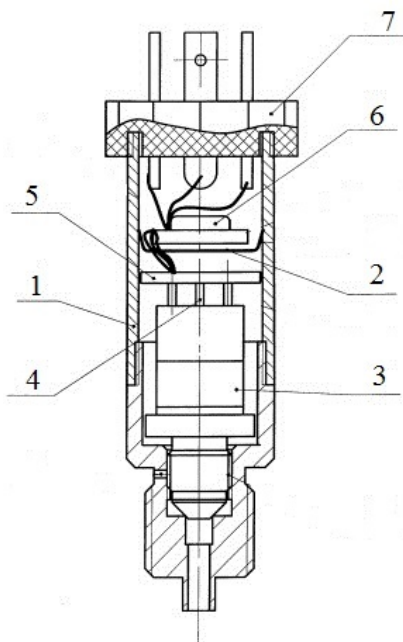


Рисунок 3.2 – Датчик давления в разрезе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР

Лист

46

1 - корпус, 2 - металлический экран, 3 - чувствительный элемент, 4 - коллектор, 5 - измерительная плата, 6 -тепловыделяющий элемент, 7 - штекерная колодка

Чувствительный элемент и мембрану (Рисунок 3.3) разработаем методом аддитивных технологий, т.е. 3D печатью.

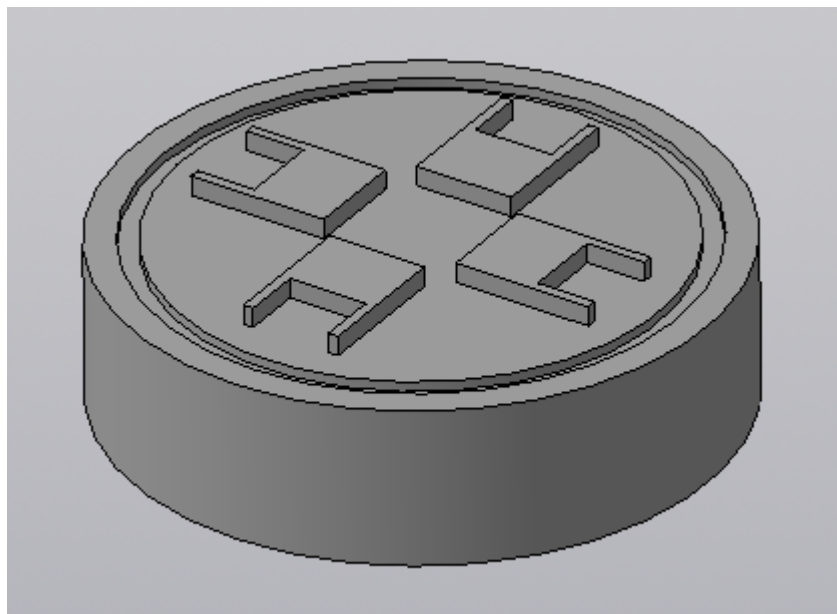


Рисунок 3.3 – Чувствительный элемент

Рассмотрим основные методы основные технологии печати металлом:

- 1) селективное лазерное спекание (SLM – технология);
- 2) электронно-лучевая плавка (EBM – технология).

Для этого выберем метод **селективной лазерной плавки** (SLM-способ).

Частицы металлического порошка проходят этапы расплавления и сварки между собой. Создание детали ведется на основе плавления порошков мелкой дисперсии слой за слоем. Процесс происходит в герметичной камере, в среде инертного газа (аргон или азот). Главный критерий используемых материалов – сыпучесть [18].

Достоинства SLM-способа:

- 1) создание изделий с множеством закрытых полостей, а также объектов с большой площадью поверхности, но малым объемом;
- 2) практически неограниченная область применения.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Недостатки SLM-способа:

- 1) внутренние напряжения в изделии;
- 2) ограничение в использовании материалов с высокой температурой плавления;
- 3) высокая стоимость оборудования и исходных материалов.

Материал, из которого мы будем изготавливать датчик давления выберем титановый сплав Ti6Al4V (ГОСТ ИСО 5832-3).

На рисунке 3.4 указан 3D-принтер, на котором будем изготавливать чувствительный элемент датчика давления.



Рисунок 3.4 – 3D-принтер SLM 125 HL

Технические характеристики принтера:

Объем	камеры,
мм.....	125x125x125
Толщина слоя, мкм.....	20–75
Скорость построения, см ³ /час	до 25
Материал.....	металлические порошки
Процесс печати начинается с разделения цифровой 3D-модели изделия на слои толщиной от 20 до 100 мкм с целью создания 2D-изображения каждого	

слоя изделия. Отраслевым стандартным форматом является STL- файл. Этот файл поступает в специальное машинное ПО, где происходит анализ информации и ее соизмерение с техническими возможностями машины.

На основе полученных данных запускается производственный цикл построения, состоящий из множества циклов построения отдельных слоев изделия.

Цикл построения слоя:

- 1) нанесение слоя порошка заданной толщины 50мкм на плиту построения, закрепленную на подогреваемой платформе построения;
- 2) сканирование лучом лазера сечения слоя изделия;
- 3) опускание платформы вглубь колодца построения на величину, соответствующую толщине слоя построения.

Процесс построения изделий происходит в камере SLM машины, заполненной инертным газом (азот). Основной расход инертного газа происходит в начале работы, при продувке камеры построения, когда из нее полностью удаляется воздух (Рисунок 3.5).

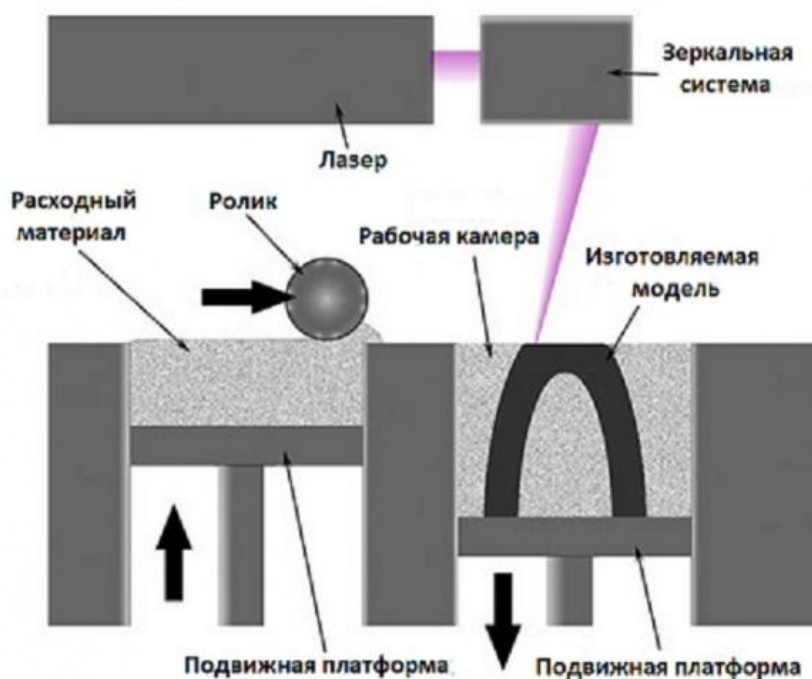


Рисунок 3.5 – Процесс создания детали SLM-способом

После построения датчик вместе с плитой извлекается из камеры SLM машины, после чего изделие отделяется от плиты механическим способом. От построенного изделия удаляются поддержки, производится финишная обработка построенного изделия.

Практически полное отсутствие кислорода позволяет избегать окисдации расходного материала, что делает возможной печать таким материалом, как титан.

3.3 Разработка конструкции датчика и технологический процесс сборки измерительной системы

При разработке конструкции устройства, необходимо учитывать ряд факторов и условий, необходимых для его нормальной работы. Прежде всего, это простота в использовании, функциональная простота, надежность.

Разработанный датчик представляет собой цилиндр диаметром 30 и высотой 100 мм, изготовленный из специального материала, устойчивого к агрессивным средам.

Нить вырезается по контуру датчика для установки на рабочий объект. Дно снабжения жилищем обеспечивает продетую нитку поверхность с зазубринами для легкой привинчивать. Крепежные детали датчика унесены без всех дополнительных приборов или приборов. Верхняя крышка позволяет более качественно закрепить воспринимающую мембрану, а также служит для нее защитой. Снятие электрического сигнала с датчика, а также напряжения питания к нему осуществляется с помощью трех медных жестко закрепленных клемм.

Технологический процесс сборки устройства производится в следующем порядке:

1. Чувствительная мембрана крепится к корпусу датчика с помощью верхней крышки. Все части соединены совместно ультразвуковой заваркой.
2. Держатель склеен к ЧЭ и ПП с припаянными элементами и готовыми пусковыми площадками контакта.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Выводы из ЧЭ осуществляются через специальные отверстия и заполняются герметикам.

3. Насыпается необходимое количество шкурок и устанавливает держатель, приклеенный к нему ЧЭ и ПП. Крепление держателя к стенкам корпуса осуществляется с помощью ультразвуковой сварки.

4. К ПП крепят жесткие выводы пайкой.

5. Датчик настроен и отрегулирован подверганный действию известного давления. Регулировка сделана посредством уравнивать и регулировать резистор, зафиксированный на ПП.

6. Дно приварено к нижней крышке с отверстиями, в которые вставлен диэлектрик для предотвращения контакта с токоведущими конструкциями.

Для лучшей герметизации и защиты диэлектрика, все заполнено герметикам. В качестве изоляционного материала можно использовать, например, резину или пластик. Выбор не основной потому что напряжение тока мало, и диэлектрик защищен.

7. Датчик обрабатывается (шлифуется, очищается).

Вывод по разделу: был выбран материал и способ 3D-печати чувствительного элемента, рассмотрен цикл построения слоя, создана 3D-модель чувствительного элемента, разработан технологический процесс сборки измерительной системы.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено исследование влияния внешних факторов на характеристики датчиков давления и температур, что позволило учесть их в процессе моделирования чувствительного элемента и модуля с помощью математических моделей. С учетом иерархии структур датчиков физических величин разработаны алгоритмы и процессы математического моделирования, с учетом разницы принципов преобразования физических величин давления и температуры. Так же были написаны алгоритмы технологии изготовления конструкции датчика давления, чувствительного элемента и технологически процесс сборки измерительной системы, основанные на численных методах и прикладных методах.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фрайден, Дж. Современные датчики – справочник / Дж. Фрайден. - М.: Изд-во Техносфера, 2005. - 359-377 с.
2. Виглеб, Г. Датчики / Г. Виглеб М.: Изд-во Мир, 1989. - 62-75 с.
3. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: В двух книгах. Книга 2 / Ж. Аш. - М.: Изд-во Мир, 1992. - 169-187 с.
5. Датчики Метран-150 и Rosemount на базе емкостной ячейки / [Электронный ресурс] - <http://isup.ru/>
6. Датчики измерения давления [Электронный ресурс] - <http://www.devicesearch.ru/>
7. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления / Ю.Н Тиняков, С.А. Милешин, К.А. Андреев, В.Ю. Цыганков, М.: Наука и образование, 2011. - 1-13 с.
8. Метран. Датчики давления [Электронный ресурс]- <http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/Pages/Home.aspx>
9. Ширяев, Ю. TruStability датчики давления номер один по стабильности / Ю Ширяев - https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2010_11_32.pdf
10. Расчет количества датчиков достаточного для достоверного измерения давления ледового покрова на стенке нефтедобывающей платформы /С.Г. Глеч, В.А. Крамарь, В.Р. Душко, И.Ю. Липко. – Севастополь, 2014. – с.157–164.
11. Ростомян, Г.Б. Методика сравнительного анализа датчиков давления / Г.Б. Ростомян, В.В. Иванов, В.А. Лобцов – М.: 2014. – 128 с.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

12. ГОСТ 2.052-2006 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия.- М.: Стандартинформ, 2006. -7 с.

13. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. - М.: Стандартинформ, 2006. -14 с

14. Агеев, О.А., Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин / О.А. Агеев, В.М. Мамиконова, В.В. Петров, - Таганрог: 2000. – 153 с.

15. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 800 с.

16. Анго, А., Математика для электроники радиоинженеров / А. Анго. – М.: Изд-во: Наука, 1964. - 779с.

17. Джашитов, В.Э., Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов. - Саратов: Изд-во Сарат., 1998 - 236 с.

18. Зленко М.А., Аддитивные технологии в машиностроении /М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – СПб.: Политех, 2013. – 221 с.

19. ГОСТ ИСО 5832-3. Металлические материалы. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2015. – 6 с.

20. Аюпова, Р. И. Современное состояние и тенденции развития отечественной инструментальной промышленности / Р.И. Аюпова, А.Б. Пелипенко // 2013. - № 12. - С. 30–32.

21. Грибовский, А. А. Алгоритмы выбора технологий быстрого прототипирования для единичного и мелкосерийного производства изделий / А.А. Грибовский, Г.Т. Тамбовцева // Тр. молодых ученых. 2011. - №. 2. - . С. 207–209.

22. Бояринцев, А. В. Быстрое изготовление пилотных серий деталей из термопластичных полимерных материалов / А.В. Бояринцев, В.Г. Дувидзон, Д.С. Подсобляев // Полимерные материалы. - 2013. - № 6. - С. 4–9.

					12.03.01 2018 КЭ-475 ПЗ.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

23. Яблочников, Е.И. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов / Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, А. В. Пирогов //2013. - №5. - С. 74-75.

24. Пьявченко, О.Н. Погрешности интеллектуальных датчиков давления / О.Н. Пьявченко, Е.В. Удод // Известия ТРТУ. Серия «Тематический выпуск». – 2015. – С. 126-132.

25. Зацерклянный, О.В. Интеллектуальные датчики давления с элементами управления и архивирования / О.В. Зацерклянный // Известия ЮФУ. Серия «Технические науки». – 2014. - С.144-146.

26. Мишанин, А.А. Полупроводниковые чувствительные элементы датчиков давлений на основе наноструктурированного поликристаллического кремния / А.А. Мишанин, А.В. Родионов, С.В. Козин // Компоненты и технологии. – 2009. - №9. - С.29-32.

27. Ширяев, Ю.А. TruStability — датчики давления номер один по стабильности / Ю.А. Ширяев // Компоненты и технологии. – 2010. - № 11 – С. 32-34.

28. Николаенко, А.Ю. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, П.А. Львов, Р.С. Коновалов, В.В. Хаустов // Вестник СГТУ. - 2014. - № 4 – С. 154-160.

29. Ростомян, Г.Б. Методика сравнительного анализа датчиков давления / Г.Б. Ростомян, В.В. Иванов, В.А. Лобцов // Электропитание. Серия «Специальные устройства» – 2015. - №4. - С. 53-58.