Разработка и моделирование МЭМС-датчика давления воздушной среды

Руководитель: доктор техн. наук, профессор Чижик С.А.

Выполнил: студент гр.11310115 Николаева Тамара Анатольевна

Объект исследования: датчик давления емкостного типа.

Предмет исследования: характеристики датчика давления емкостного типа, в частности величина прогиба мембраны и изменения емкости в зависимости от прилагаемого давления и толщины мембраны.

Цели и задачи исследования: целью работы является исследование зависимости основных параметров датчика давления емкостного типа.

Для достижения данной цели будут выполнены следующие **задачи**:

- Обзор конструкций существующих датчиков давления;
- Математическое моделирование параметров датчика давления емкостного типа;
- Разработка емкостного датчика давления в среде

Датчиком давления – преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкости конденсатора. В качестве исследуемой среды может выступать пар, жидкость или какой-нибудь газ, в зависимости от сферы применения конкретного датчика.

Существуют различные типы датчиков давления:

- резонансные;
- пьезоэлектрические;
- пьезорезонансные;
- емкостные;
- индуктивные (магнитные);
- оптоэлектронные,

которые сегодня доступны на рынке для использования в промышленности. Каждый из них имеет преимущества в определенных ситуациях.

Достоинства емкостных датчиков давления

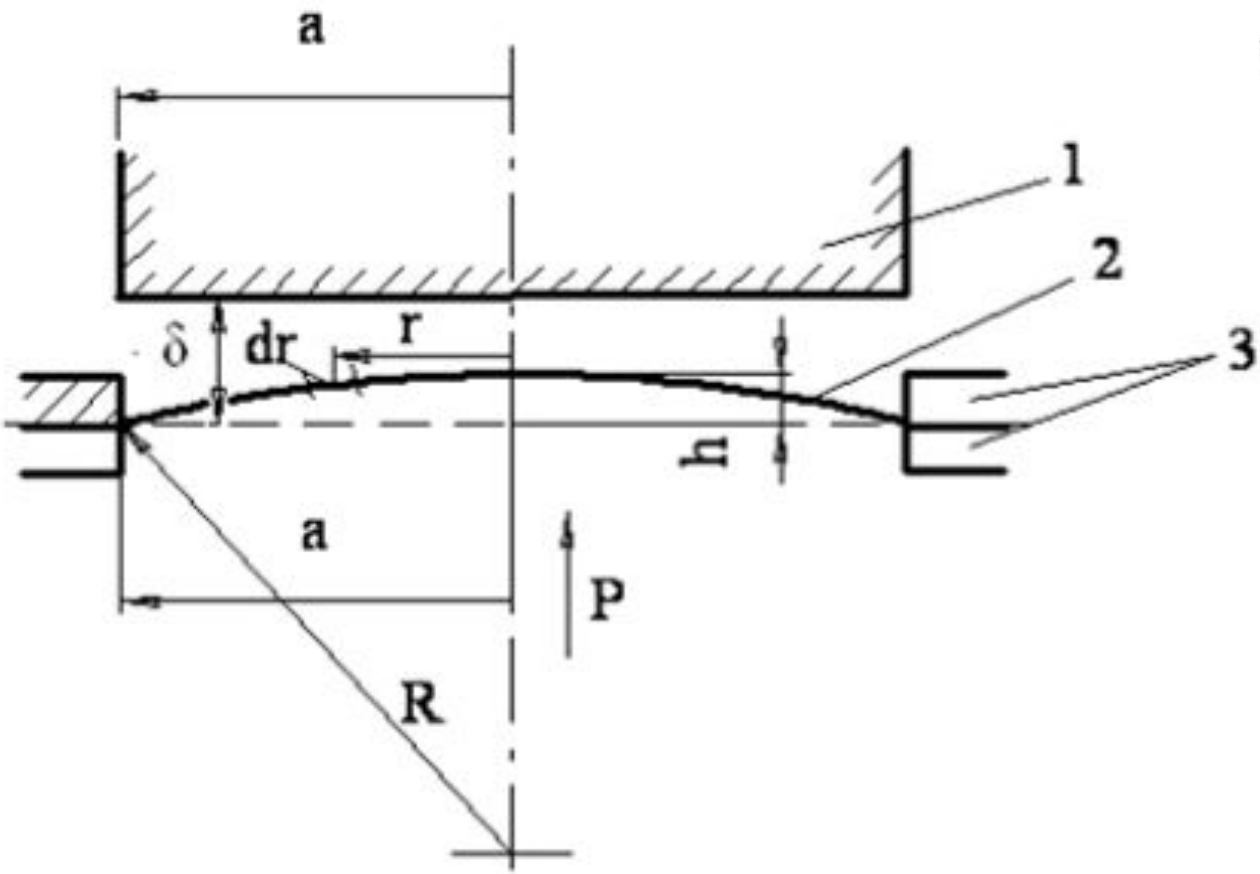
Емкостные датчики имеют множество преимуществ в отличие от других видов. К ним можно отнести:

- Длительная эксплуатация;
- Высокий порог чувствительности;
- Небольшая инерционность;
- Отсутствие подвижных контактов;
- Повышенная чувствительность;
- Малый расход энергии;
- Небольшие габаритные размеры и масса;
- Технологичность при изготовлении, применение дешевых материалов и веществ.

Емкостные датчики славятся своей простой конструкцией, что дает возможность создания надежных и прочных устройств. Свойства конденсатора зависят всего лишь от геометрических параметров, и не имеют зависимости от свойств применяемых материалов, при условии их правильного подбора. Поэтому при проектировании пренебрегают влиянием температуры на площадь поверхности.

Расчет прогиба и изменения емкости датчика давления в линейном приближении

Линейное приближение теории изгиба тонких пластин, используемое для определения прогибов и полей деформаций в упругих элементах микромеханических систем, является наиболее наглядным и распространенным. Однако оно справедливо лишь в области малых прогибов (максимальный прогиб не должен превышать одной-двух десятых толщины диафрагмы). Основной причиной, ограничивающей применимость линейной теории, является пренебрежение нормальными и касательными напряжениями, действующими в срединной плоскости.



Расчетная модель емкостного чувствительного элемента датчика давления с кремниевой растягивающейся мембраной

1 – неподвижный электрод; 2 – мембрана; 3 - держатель

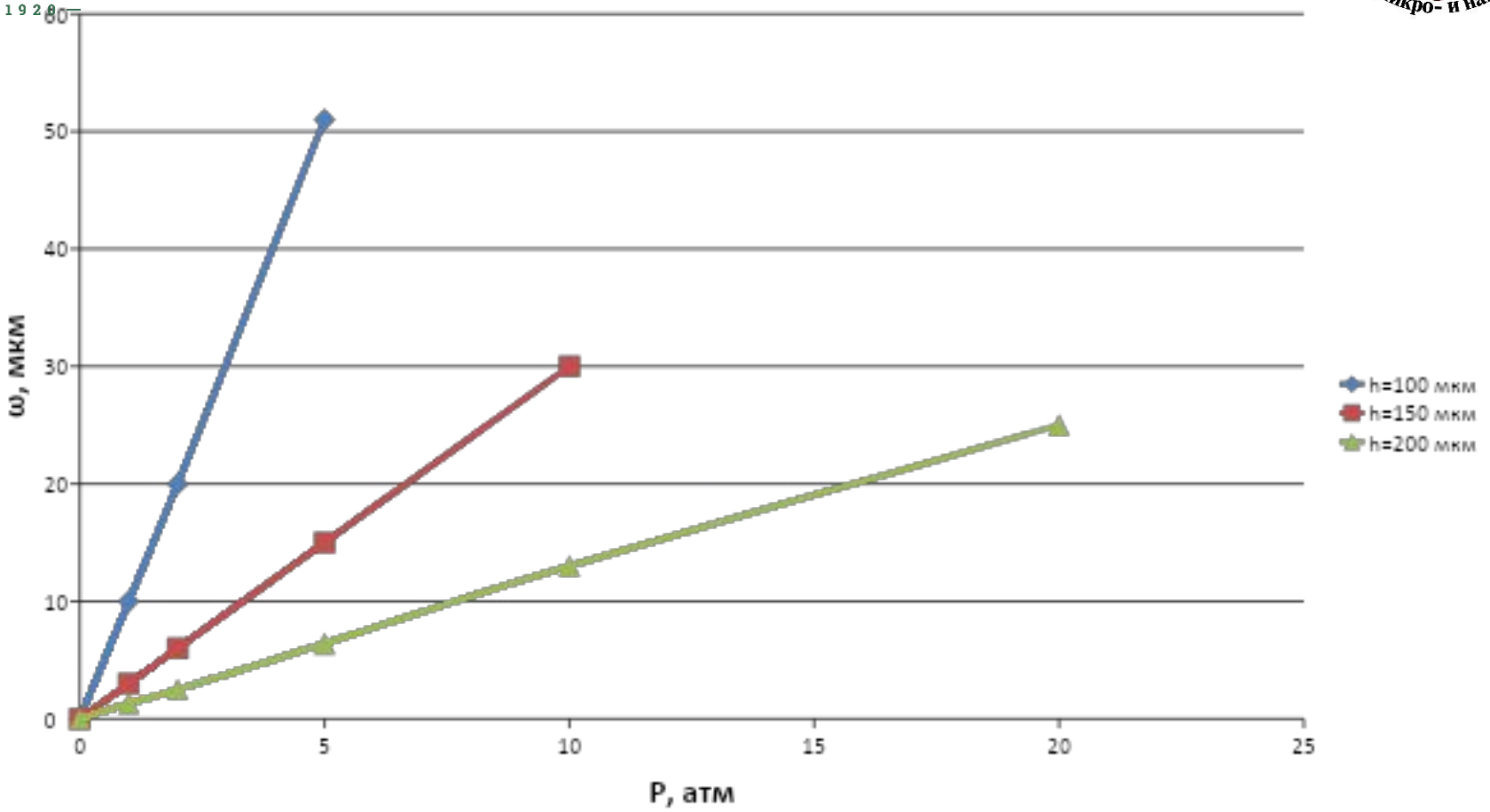
P – давление, R – радиус мембраны, h – толщина мембраны, a – радиус периферии мембраны, r – полярный радиус

- Прогиб мембраны определяется по следующей формуле:

$$\omega = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot P \cdot R^4}{12 \cdot E \cdot h^3}$$

Результаты расчетов для толщин мембраны 100, 150, 200 мкм и давлений 1, 2, 5 и 10 атмосфер приведены в таблице:

1	10	3	1,3
2	20	6	2,5
5	51	15	6,4
10	-	30	13
20	-	-	25



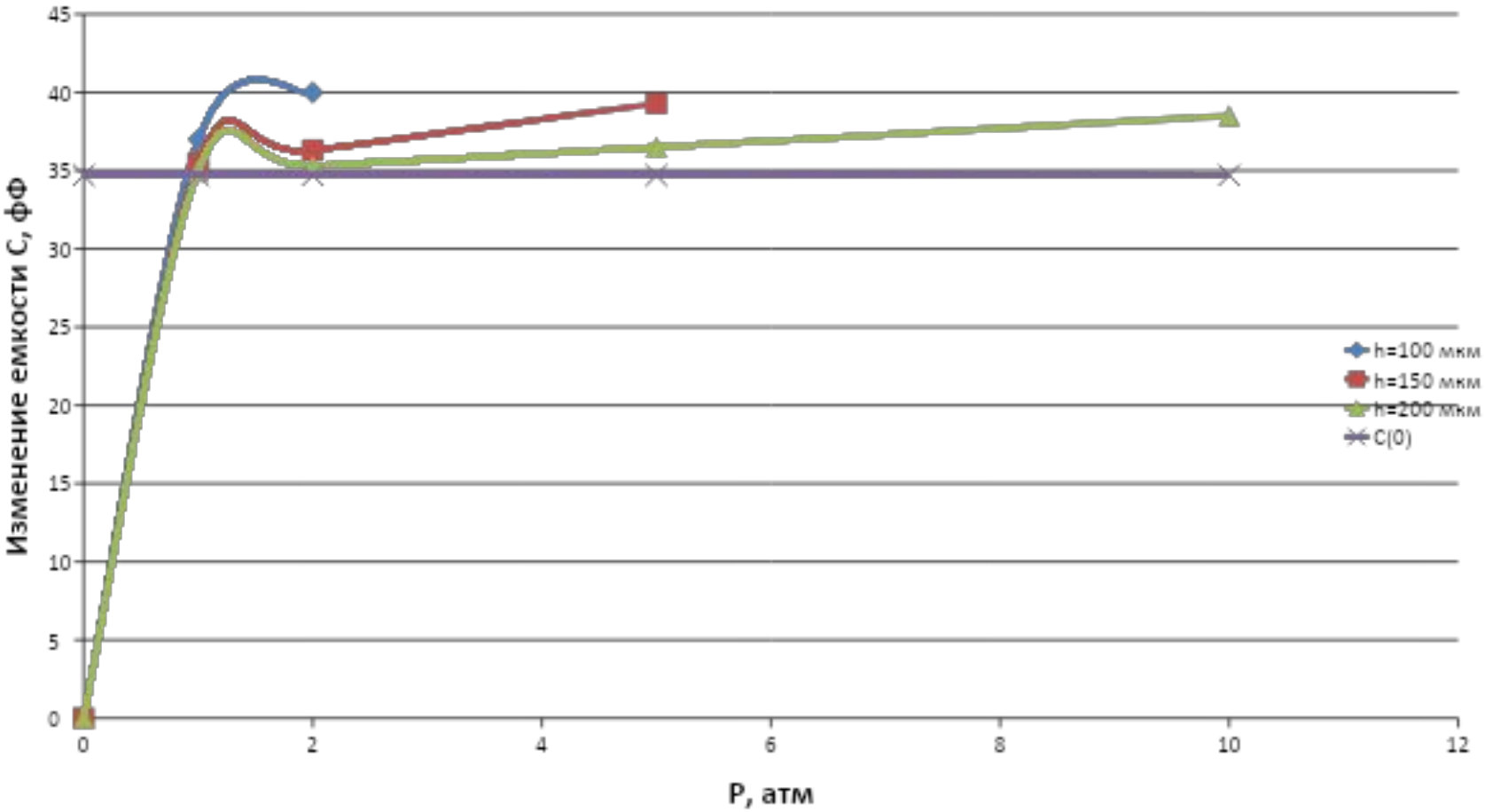
Зависимость прогиба мембраны от давления для различных толщин мембраны

- Начальная емкость определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta} = 34{,}7\ \text{фФ}$$

Величина емкости и ее изменение рассчитывались с учетом разбиения площади мембраны на области, позволяющие использовать выражение для определения начальной емкости, что значительно сокращает трудоемкость расчетов, получая при этом удовлетворительную точность расчетов. Результаты расчетов представлены в таблице:

1	37	35,5	35
2	40	36,3	35,3
5	-	39,3	36,5
10	-	-	38,5



Зависимость изменения емкости от давления для различных толщин мембраны

Расчет прогиба и изменения емкости датчика давления в нелинейном приближении

- Прогиб мембраны определяется по следующей формуле:

$$\omega = 0{,}6667 \cdot h[F - (\lambda F)^{-1}]$$

где

$$F = \left[\frac{0{,}0035623}{\lambda} SP + \sqrt{\frac{1}{\lambda^3} + \left(\frac{0{,}0035623}{\lambda} SP\right)^2}\right]^{1/3}$$

$$\lambda = 0{,}7 + 0{,}4\nu - 0{,}3\nu^2,$$

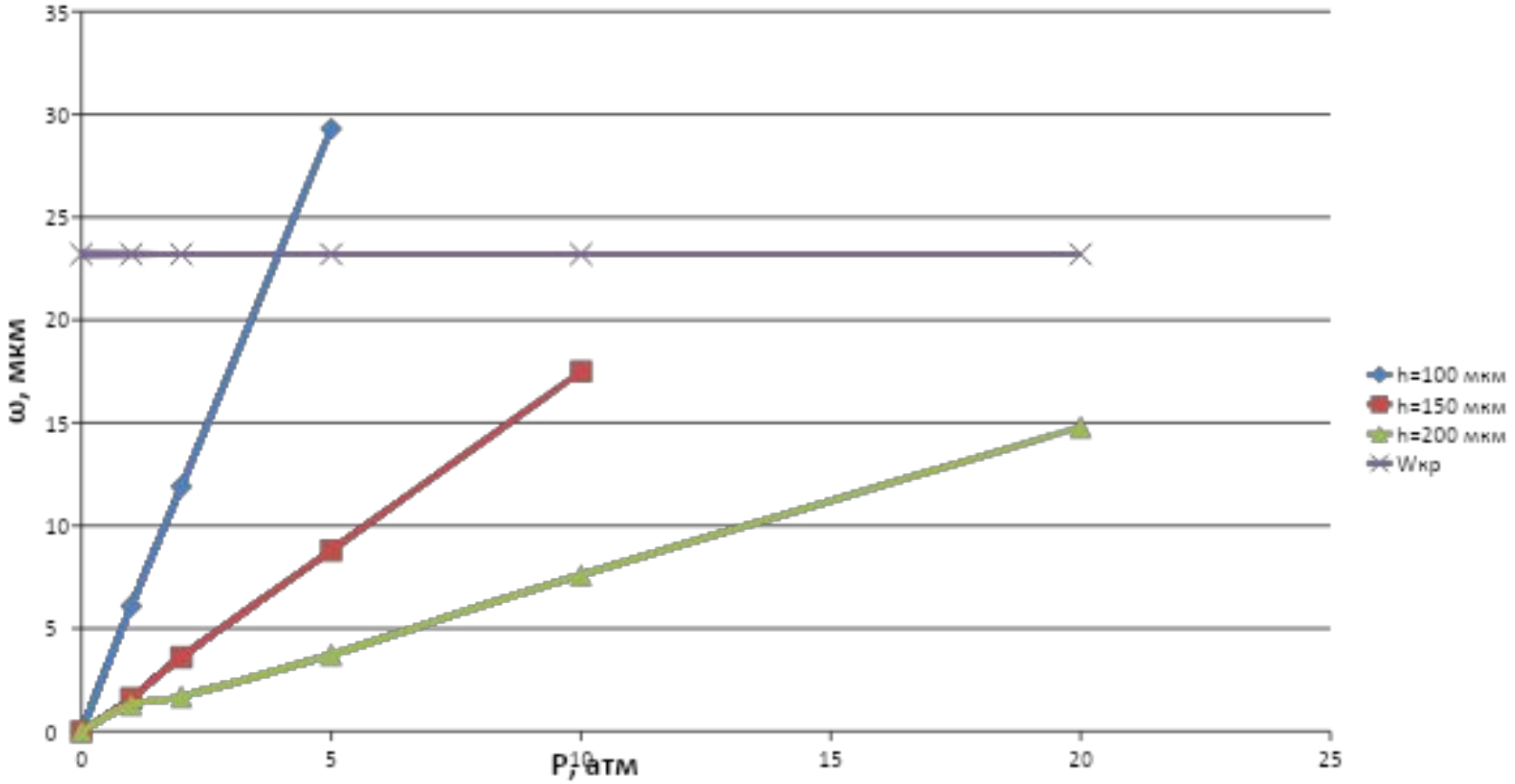
$$SP = PS^2/(Dh)\,.$$

Критический прогиб определяется по формуле:

$$\omega_{\text{кр}} = 0{,}464 \cdot d = 23{,}2 \text{ мкм}$$

Результаты расчетов прогиба для толщин мембраны 100, 150, 200 мкм и давлений 1, 2, 5 и 10 атмосфер приведены в таблице:

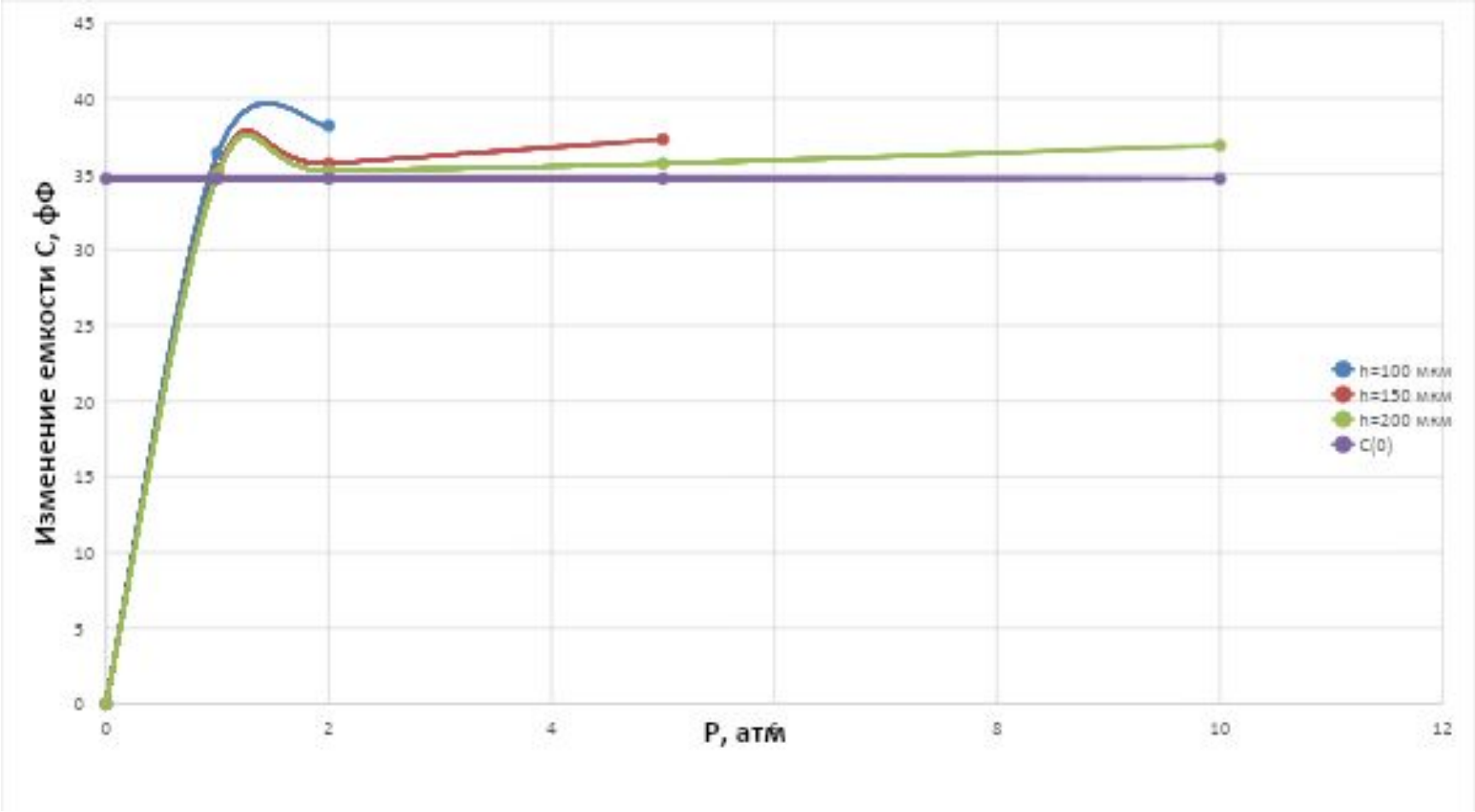
1	6,1	1,6	1,3
2	11,9	3,6	1,7
5	29,3	8,8	3,73
10	-	17,5	7,6
20	-	-	14,8



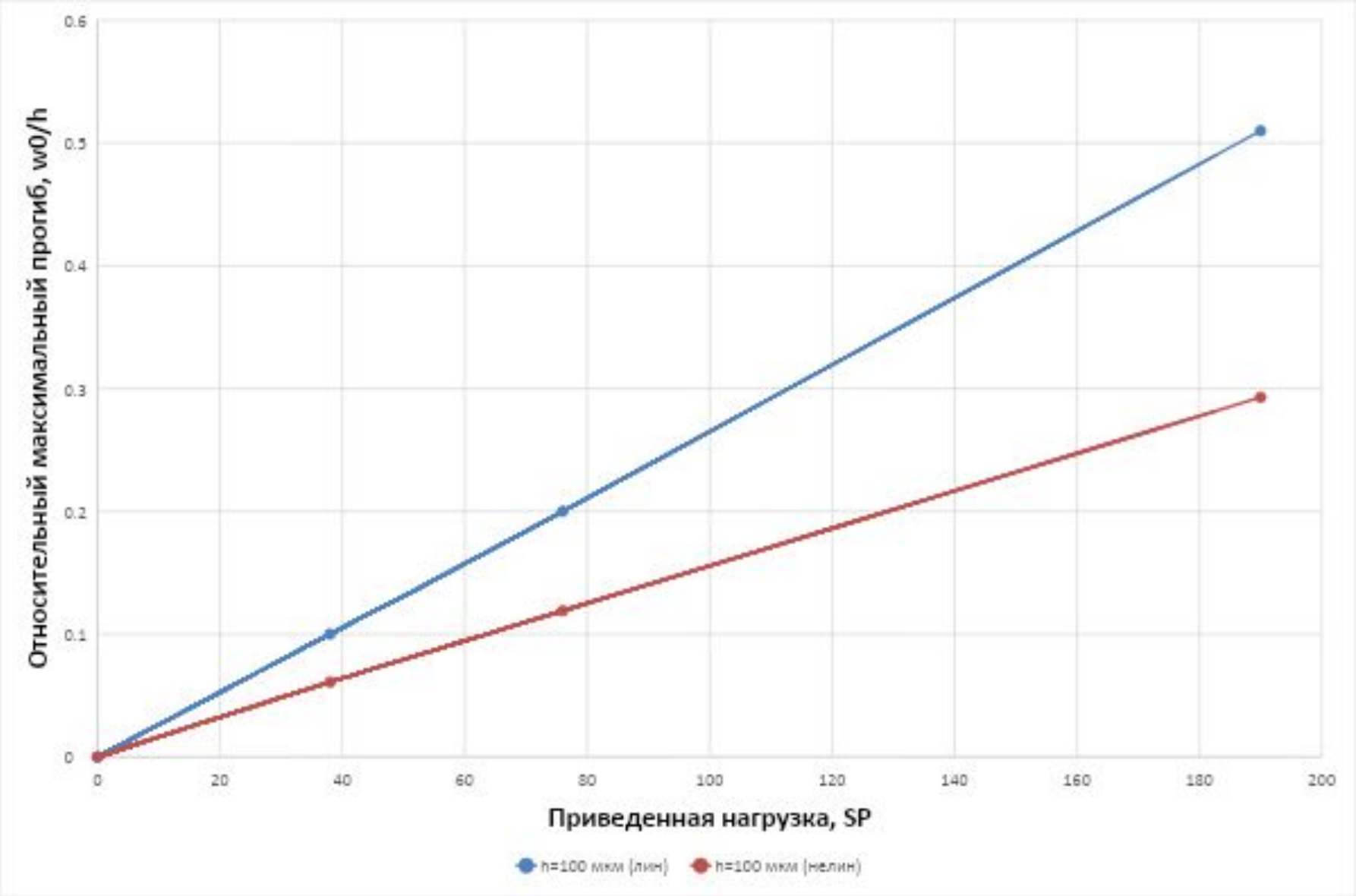
Зависимость прогиба мембраны от давления для различных толщин мембраны

Результаты расчетов изменения емкости представлены в таблице:

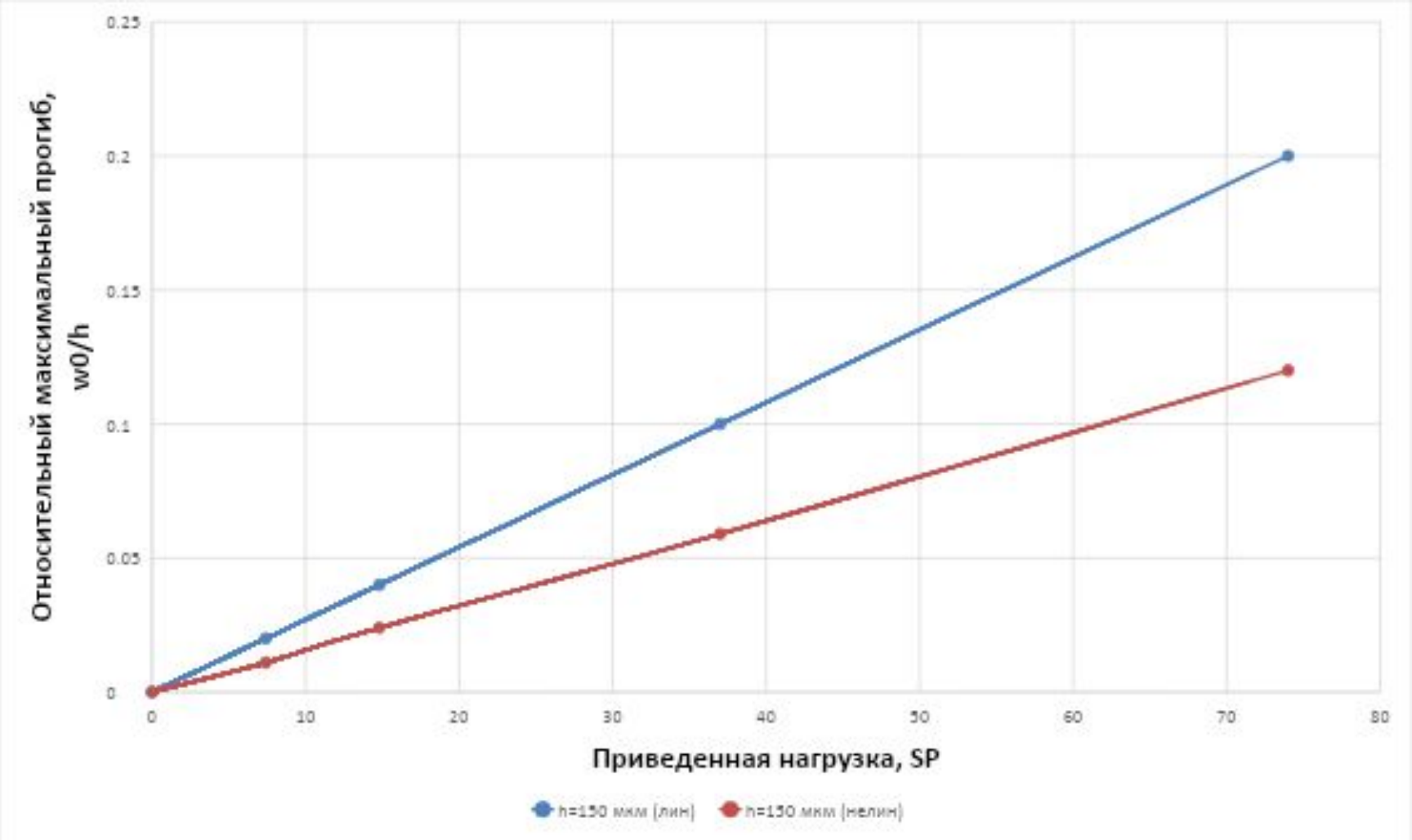
1	36,4	35,2	35
2	38,2	35,7	35,2
5	-	37,3	35,7
10	-	-	36,9



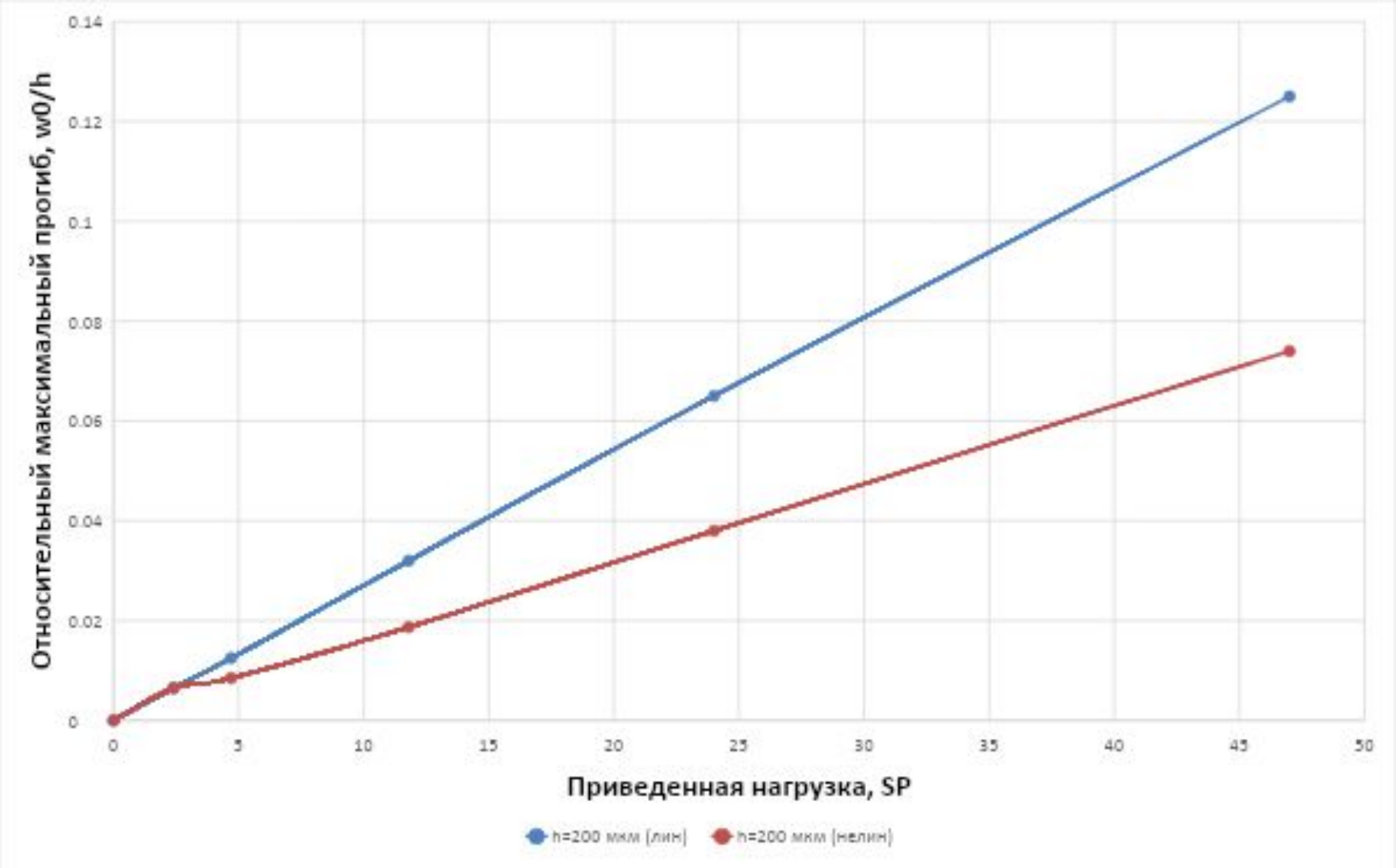
Зависимость изменения емкости от давления для различных толщин мембраны



Зависимость относительного максимального прогиба w_0/h ($h = 100$ мкм) для круглой мембраны от приведенной нагрузки SP



Зависимость относительного максимального прогиба w_0/h ($h = 150$ мкм) для круглой мембраны от приведенной нагрузки SP



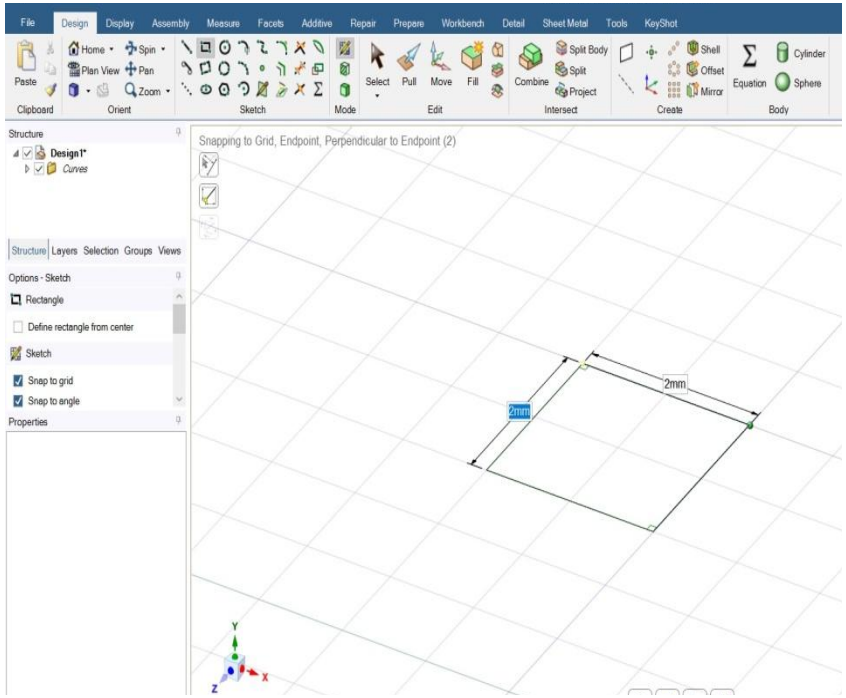
Зависимость относительного максимального прогиба w_0/h ($h = 200$ мкм) для круглой мембраны от приведенной нагрузки SP

РАЗРАБОТКА МЭМС-ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ЕМКОСТНОГО ТИПА В СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH

В качестве объекта моделирования была выбрана конструкция кристалла датчика давления. Моделирование проводилось в программе ANSYS Workbench.

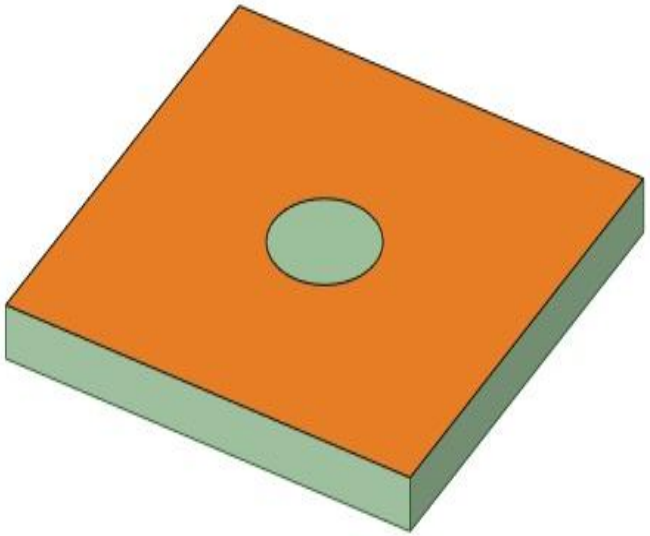
Этап построения геометрической модели реализуется элементом *Geometry*. Геометрическая модель создается в модуле *Design Modeler*, который реализует современные методы моделирования плоской и трехмерной геометрии.

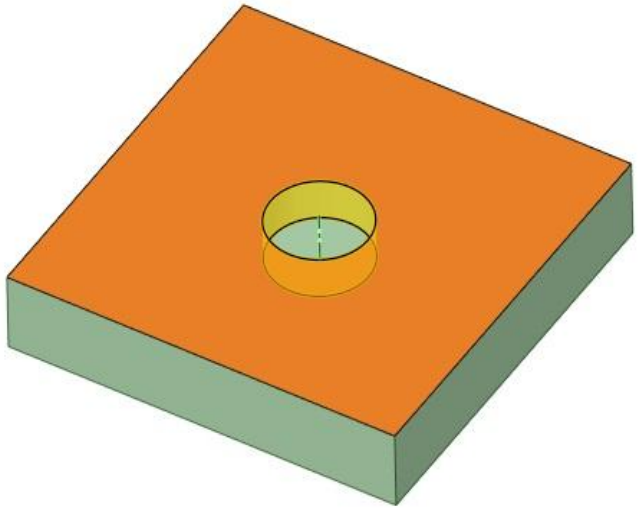
С помощью команды *Rectangle* создаем двумерную модель на рабочем поле размером 2x2 мм.



Чтобы создать трехмерную модель, воспользуемся командой *Pull*. Эта команда позволяет вытянуть конструкцию до нужного размера. Первым шагом вытягиваем кристалл на 180 мкм, для того чтобы сделать в центре кристалла отверстие для мембраны. Вторым шагом, с помощью команды *Circle*, создаем окружность в центре кристалла диаметром 500 мкм.

Следующим шагом вытягивает кристалл еще на 200 мкм и получаем кристалл размером 2x2x0,38 мм.

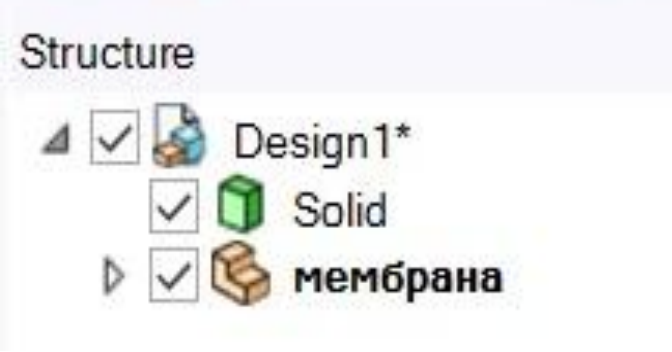


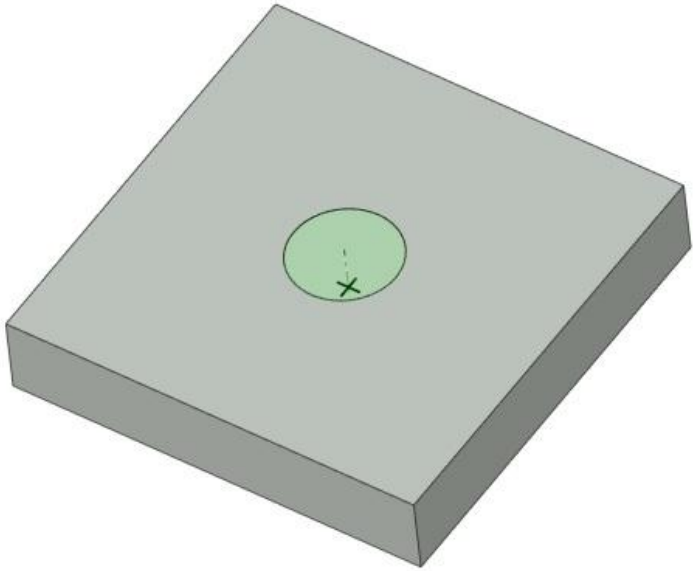


БНТУ

Далее в поле *Structure* создаем новый компонент – мембрана.

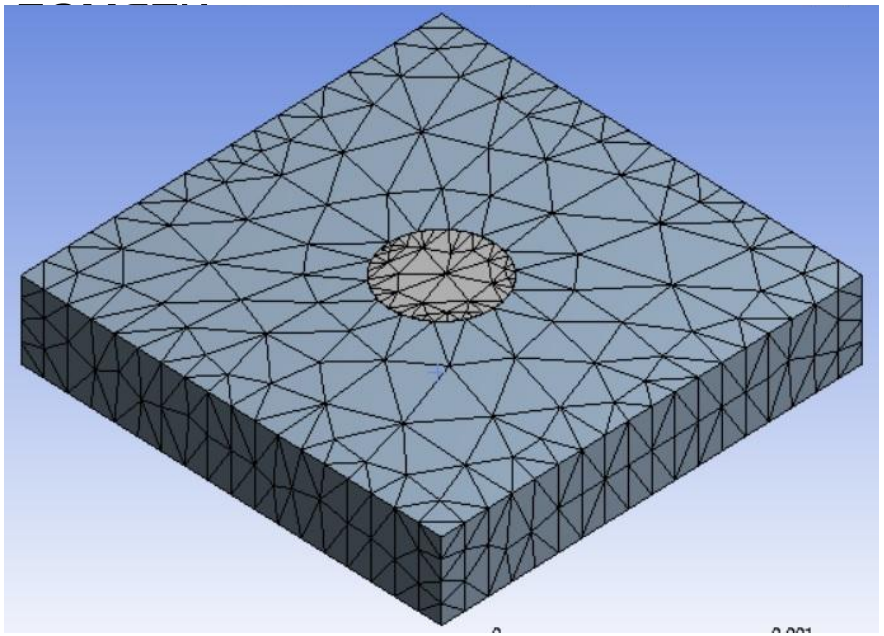
Завершающим шагом с помощью команды *Circle* создаем мембрану диаметром 500 мкм и вытягивает с помощью команды *Pull* на 200 мкм.



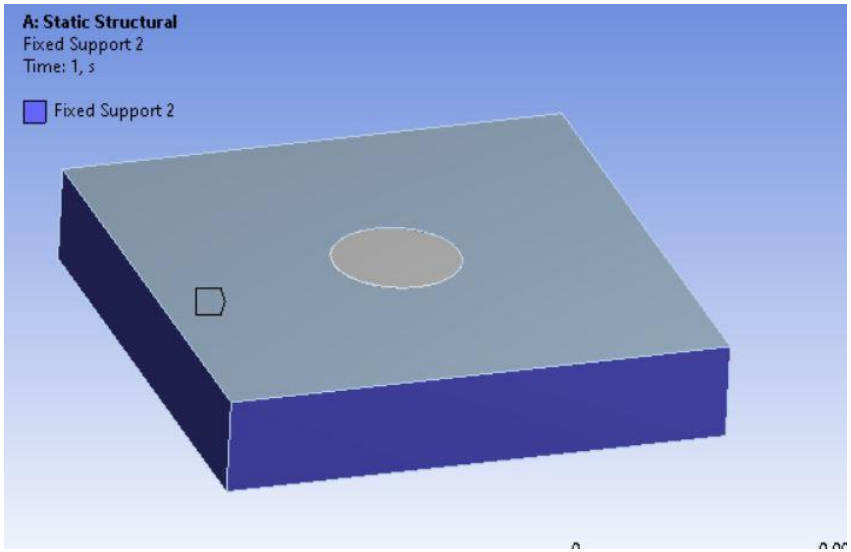


Сетка генерируется на модели и является основой для составления и решения системы уравнений в матричном виде. В данном моделировании использовалась сетка из тетраэдрических элементов. После генерации, была получена сетка, которая состоит из 1625 элементов, которые имеют 3500 расчетных узла. Для решения данной задачи такое количество КЭ является вполне достаточным.

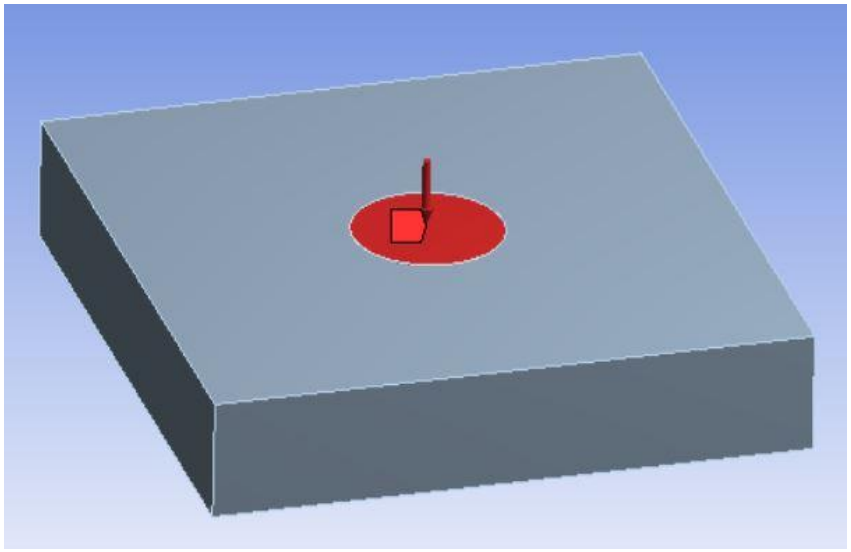
Сетка с большим числом расчетных узлов позволяет находить более точное решение, но увеличивает расчетное время и объем



Одним из важных этапов подготовки к проведению расчета и получения удовлетворительных результатов является определение внешних воздействий на конструкцию.



Закрепление кристалла



Нагружение мембраны

В таблице приведены результаты прогиба мембраны при расчёте в нелинейном приближении и расчете в ANSYS Workbench

	ANSYS	Нелинейное приближение
1	0,77	1,3
2	1,53	1,7
5	3,8	3,73
10	7,6	7,6
20	15,3	14,8

Сравнивая результаты, приведенные в таблице, можно сделать вывод, что конструкция разработана правильно, так как достигнут высокий уровень соответствия теоретических и практических данных. Результат подтверждает модель с высокой точностью.

В ходе выполнения магистерской диссертации получены следующие результаты:

- Путем математического расчета и моделирования определены прогибы и изменение емкости для датчика давления емкостного типа в линейном и нелинейном приближениях. Полученные значения прогибов имеют отличия. Это объясняется тем, что расчеты в линейном приближении определяются без учета нормальных и касательных напряжений, возникающих в срединной поверхности пластины. В свою очередь, значения изменения емкости имеют незначительные изменения.
- В среде ANSYS Workbench разработан кристалл МЭМС-датчика давления емкостного типа размерами 2x2x0,38 мм с мембраной диаметром 500 мкм и толщиной 200 мкм. Также в среде ANSYS Workbench проведен расчет, который показывает, что конструкция разработана правильно, так как достигнут высокий уровень соответствия теоретических и практических данных. Результат подтверждает модель с высокой точностью.
- Результаты данной работы будут применены при создании опытного образца.