



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2018, № 1, с. 57-65.

Поступила: 25.04.2018

Окончательный вариант: 05.05.2018

© УлГУ

УДК 004.942

## Моделирование датчика давления и анализ его свободных и вынужденных колебаний

Калинов Е. Д.<sup>1,2\*</sup>, Калинова А.Л.<sup>3</sup>

[\\*kalinov.e.d@yandex.ru](mailto:kalinov.e.d@yandex.ru)

<sup>1</sup>УлГУ, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>АО «УКБП», Ульяновск, Россия

<sup>3</sup>УлГУ, Ульяновск, Россия

---

Статья посвящена моделированию колебаний частотного датчика давления в условиях окружающей среды. Представлена конструкция и принцип работы прибора, описана постановка задачи и ее решение с применением САЕ-системы Ansys, проведен анализ полученных результатов и их сравнение с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* частотный датчик давления, связанный анализ, FSI, Fluid Structure Interaction.

---

### Введение

Одним из главных параметров для датчика давления является точность его измерений. Уменьшение неточности измерений датчика является актуальной задачей в авиаприборостроении. Для решения данной проблемы требуется модифицировать известную конструкцию устройства. Необходимо разработать модель, которая позволит анализировать работу датчика в реальных условиях функционирования с возможностью дальнейшей оптимизации конструкции прибора без необходимости построения опытных образцов промежуточных вариантов для натурных испытаний.

Целью выполненной работы является разработка математической модели для проведения спектрального анализа синусоидальной вибрации датчика давления в различных средах.

### 1. Устройство и принцип работы датчика давления

Во всех гидростатических частотных датчиках первичной информации в качестве основного измерительного преобразователя используется так называемый модуль

давления частотный, представляющий собой малогабаритный частотный датчик давления с чувствительным элементом в виде тонкостенного цилиндрического резонатора. [2]

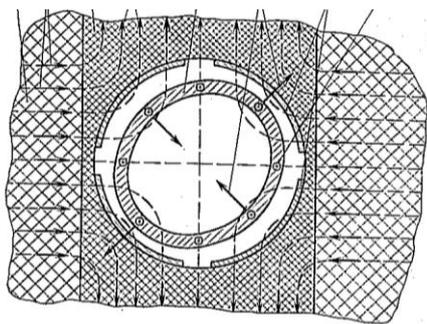


Рис. 1. Деформация резонатора в магнитном поле

Система самовозбуждения поддерживает незатухающие изгибные колебания резонатора, в процессе которых его поперечное сечение принимает форму эллипса, вытянутого попеременно то по одной, то по другой из двух взаимно перпендикулярных осей (рис. 1).

Ток от трансформатора протекает в резонаторе по направлению образующей цилиндра, находящегося в квадрупольном магнитном поле, что вызывает деформацию резонатора и сопровождается изменением емкостей, образованных обкладками [1].

## 2. Постановка задачи

Конструкция датчика и принцип его работы требует реализации следующей схемы решения задачи:

- Расчет частот собственных колебаний датчика;
- анализ механических колебаний датчика давления без учета присоединенной массы, т.е. без учета среды;
- оценка влияния воздуха и азота на частоту колебаний датчика.

Датчик давления должен обеспечивать измерение абсолютного давления с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Таблица 1. Диапазон измеряемого давления

Датчик давления	Диапазон измеряемого давления	
	гПа	мм.рт. ст.
	От 6,67 до 1199,90	От 5 до 2100

Материал, из которого изготовлен резонатор – сталь 45НХТ (таблица 2).

Таблица 2. Свойства материала 45 НХТ.

T, °C	E, $\times 10^{11}$ Па	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\sigma_B$ , МПа
20	1,79	8050	800-1180

Моделирование механических колебаний проводилось в комплексе программ Ansys с применением технологии FluidStructureInteraction (FSI), реализующей связь между анализом напряженно-деформированного состояния и газодинамическим расчетом, по схеме одностороннего взаимодействия, позволяющей передавать поверхностные нагрузки из ANSYS CFX в ANSYS Mechanical и перемещения из ANSYS Mechanical в ANSYS CFX.

## 3. Схема решения задачи

Использованы выбранные для решения задачи следующие модули.

### 1. Modal.

- Задание материала в библиотеке EngineeringData, который в дальнейшем используется во всех модулях;
- импорт геометрии в DesignModeler;
- задание фиксации конструкции;
- задание контактной пары;
- построение конечно-элементной сетки;
- задание количества искомых мод;
- получение значений частот собственных колебаний;
- передача значений в Transient Structural.

### 2. Transient Structural.

- Выставление настроек взаимодействия газа и твердого тела;
- задание сил, действующих на магниты;
- задание длительности шага и времени окончания расчета;
- проведение расчета;
- передача результатов расчета в FluidFlow (CFX).

### 3. CFX.

- Проектирование модели движущегося внутри резонатора воздуха;
- задание локальных настроек сетки (измельчение пограничных слоев), генерация конечно-элементной модели;
- задание граничных условий на входе в область и на стенках;
- задание длительности шага и времени окончания расчета;
- проведение расчета;
- анализ результатов.

## 4. Реализация расчетной модели

В модальном анализе значения всех внешних сил и демпфирование равны нулю, поэтому в качестве граничных условий задавалось только закрепление (фиксация) конструкции. В данном случае конструкция фиксируется на открытом конце на утолщенной части резонатора и на конце токосъемника (рис.2).

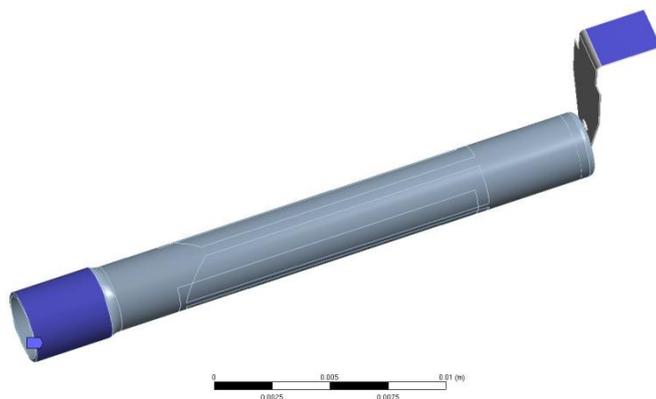
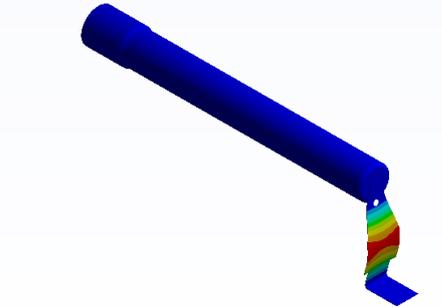
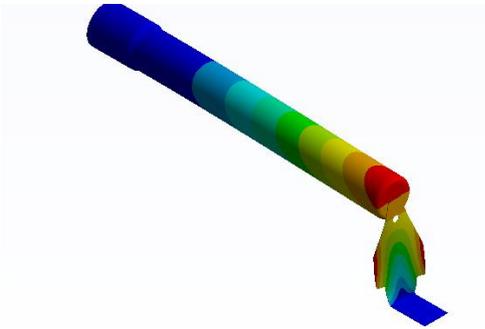
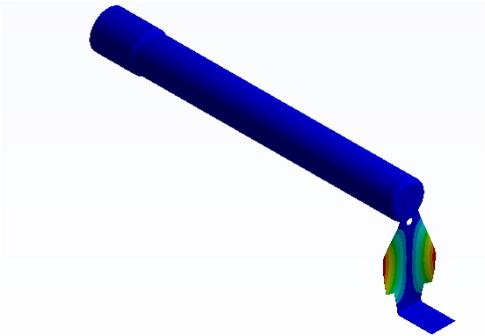
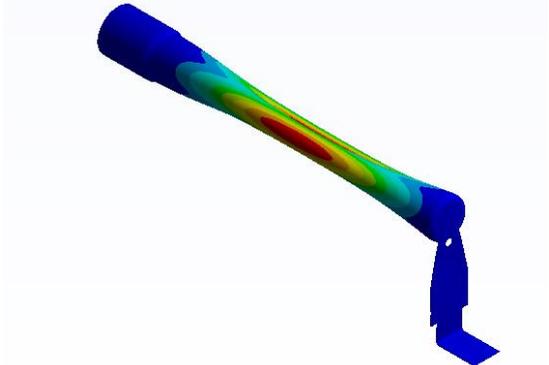
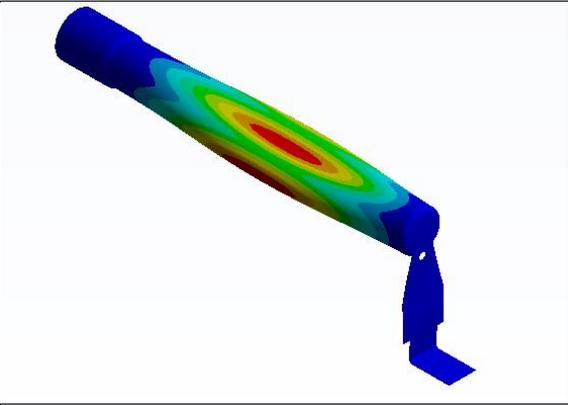
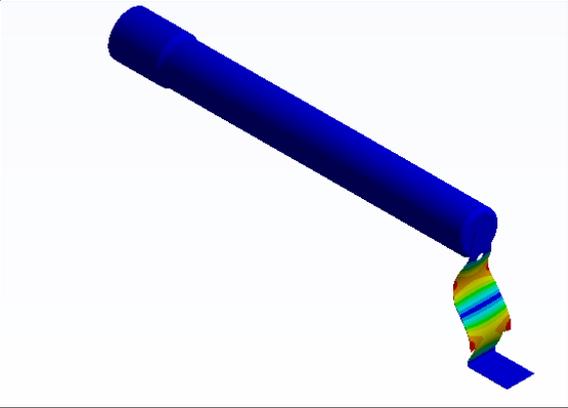
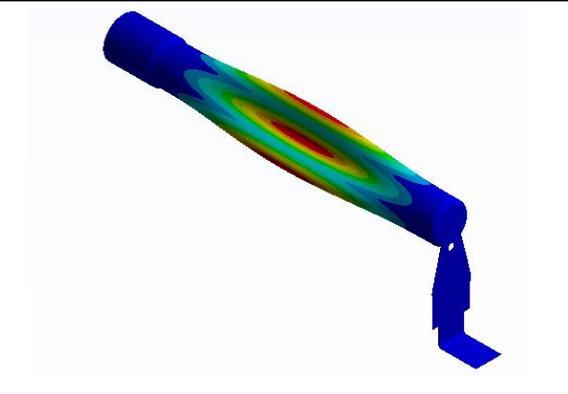
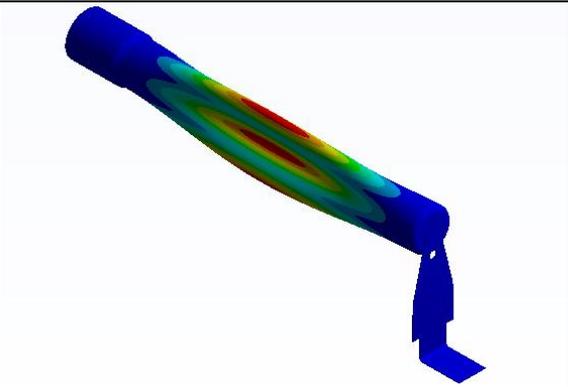


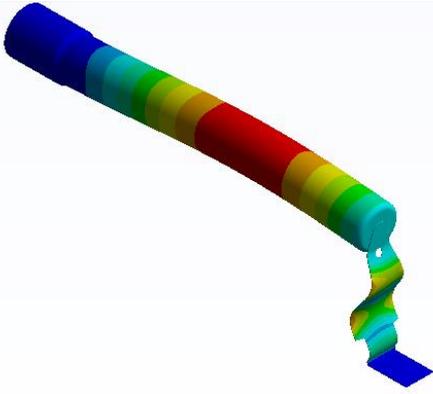
Рис. 2. Фиксация конструкции.

В таблице 3 приведены основные найденные собственные частоты и формы колебаний резонатора и опоры датчика давления.

**Таблица 3.** Полученные частоты и формы колебаний датчика

№ моды (формы)	Виды форм колебаний	Частота, Гц	Характер колебаний
1.		4452,2	Продольная форма колебаний токосъемника
2.		5735,5	Изгибная форма колебаний резонатора и продольная форма колебаний токосъемника
3.		7775,6	Изгибная форма колебаний токосъемника
4.		10783	Продольная форма колебаний (четыре узла по диаметру)

5.		10785	Продольная форма колебаний (четыре узла по диаметру)
6.		12975	2-я продольная форма колебания опоры
7.		19027	Продольная форма колебаний (шесть узлов по диаметру)
8.		19031	Продольная форма колебаний (шесть узлов по диаметру)

9.		19639	Изгибно-продольная форма колебаний токосъемника и резонатора
----	---	-------	--

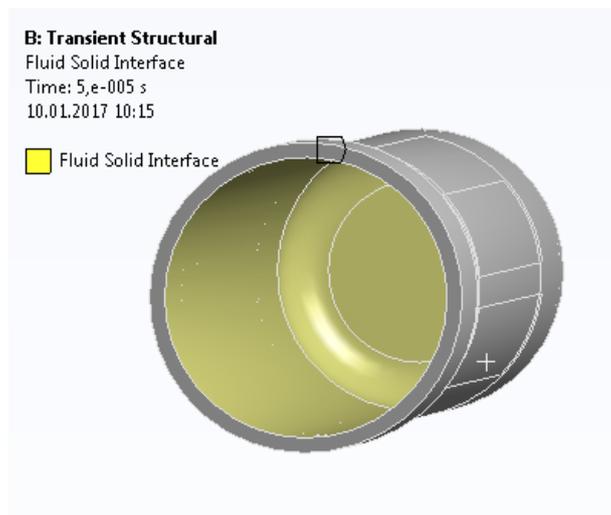
Анализ полученных результатов собственных форм и частот позволяет отметить, что нужные формы колебаний соответствуют 4 и 5 модам, собственные частоты которых равны 10783 и 10785 Гц.

По техническим характеристикам рабочей частотой датчика является  $\nu = 11\text{кГц}$ . На основании этого можем сделать вывод об адекватности полученных результатов и модели.

Рассчитанные при помощи модального анализа частоты 10783 и 10785 Гц и их формы колебаний являются рабочими. Учитывая то, что при моделировании цилиндр является идеальным, а в реальности он может иметь малые погрешности по толщине, значения частот можем округлить (предполагать равными).

В настройках Transient анализа было задано количество шагов, номер текущего шага, длительность одного шага и время окончания расчета.

Для решения задачи, связанного с взаимодействием газа(воздуха) и твердого тела, задаем FluidSolidInterface (рис. 3).



**Рис. 3.** Задание Fluid Solid Interfaces.

При работе датчика магниты воздействуют на цилиндр с силой, изменяющейся по синусоидальному закону (рис. 4).

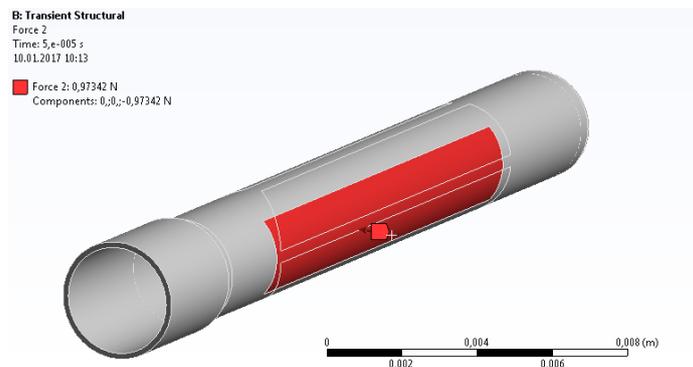


Рис. 4. Задание силы, действующей на магниты.

Результаты перемещения стенок резонатора из Transient анализа передавались в модуль FluidFlow(CFX).

Длительность одного шага и время окончания расчета в CFX заданы аналогично TransientStructural: время шага – 0,00002 сек, общее время – 0,01 сек.

В качестве граничных условий задается давление, равномерно распределенное по всему объему воздуха (величины давления заданы 0.5, 1.0, 1.5 атм.) (рис. 5).

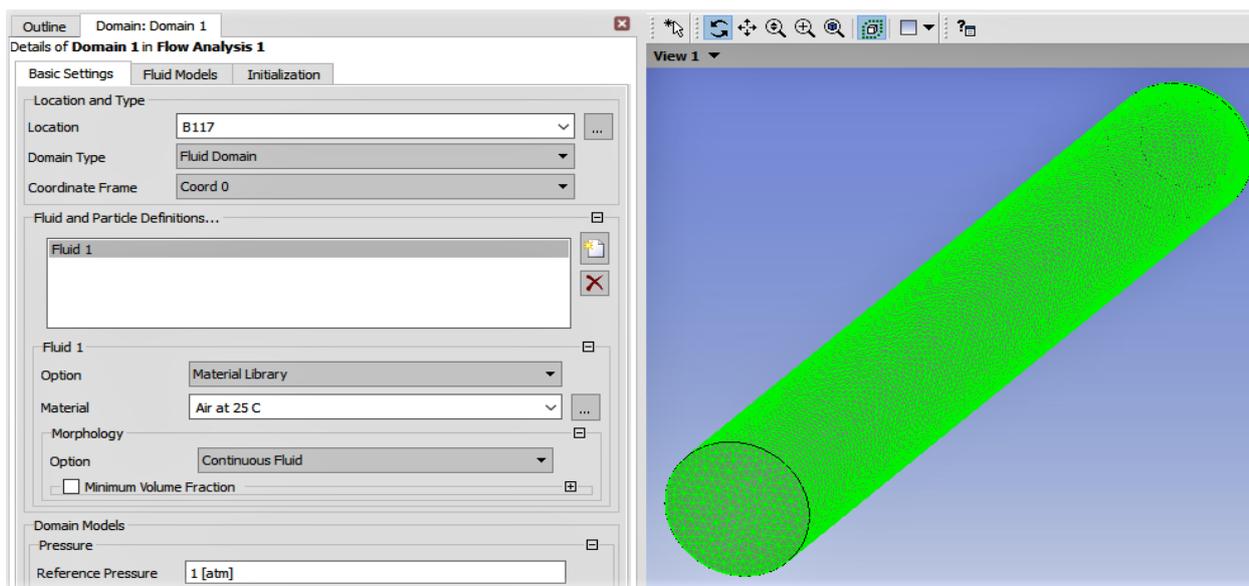


Рис. 5. Граничные условия для расчета датчика с учётом воздуха при давлении 1 атм.

Процесс – изотермический, температура равна 25°C.

## 5. Результаты

На основании результатов расчета были построены графики зависимости спектральной плотности от частоты (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что резонансные частоты находятся в пределах 11-12 кГц.

Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными, был построен график зависимости давления от частоты (рис. 7).

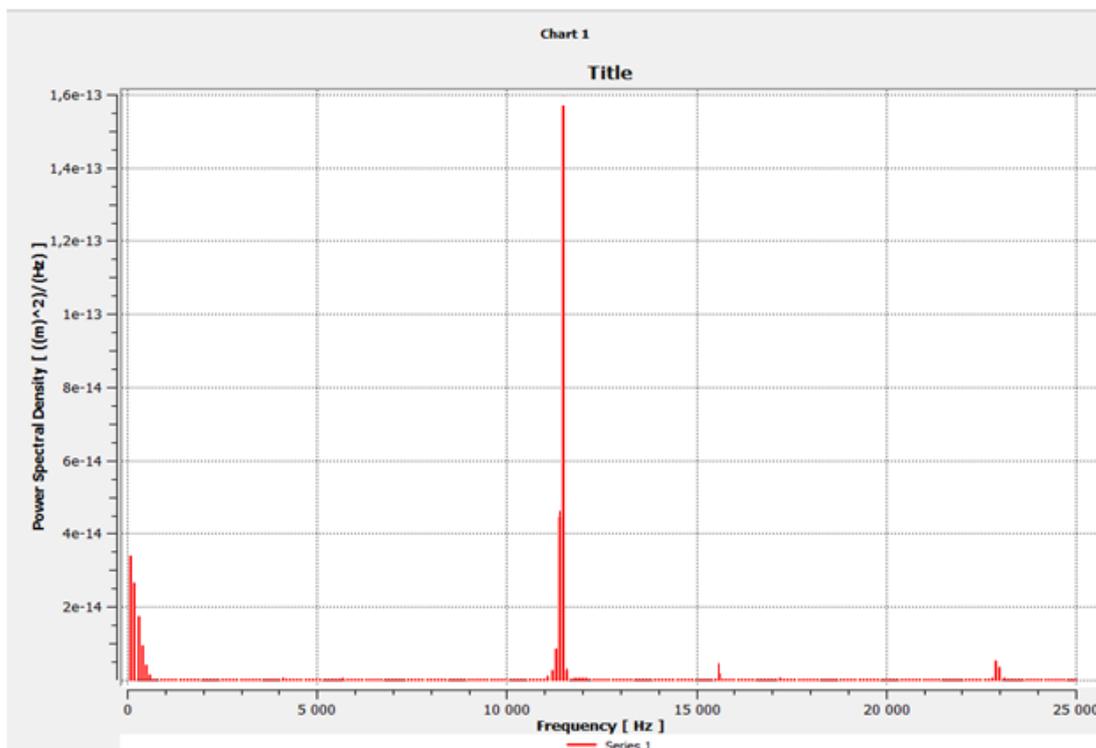


Рис. 6. График зависимости спектральной плотности от частоты.

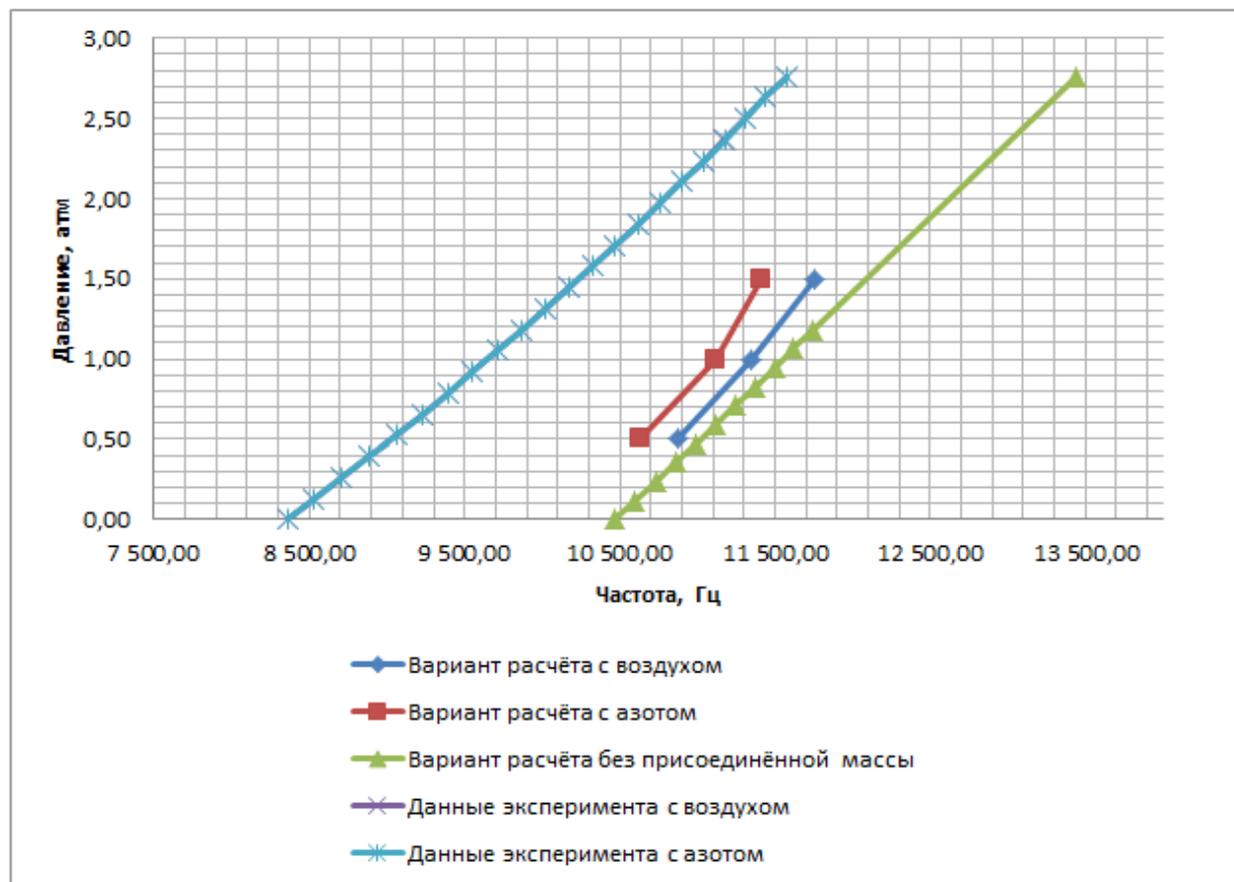


Рис. 7. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента.

## Заключение

Анализ полученных данных математического моделирования датчика дает представление о корректности построенной модели. Из графика на рис. 7 видно, что характер зависимостей, полученных по результатам моделирования и в результате эксперимента, совпадает. Значения рассчитанных частот имеют некоторый системно – аддитивный сдвиг, что связано с особенностями конкретного датчика, использованного в эксперименте, и, возможно, с укрупненными настройками расчета системы (размер и форма сетки, количество шагов интегрирования), но при этом они пропорциональны экспериментальным, на основании чего полученные результаты можно считать адекватными. При проведении анализа частот и форм свободных колебаний датчика могут также быть использованы численные методы [3, 4], которые дают приближенное решение не только для форм перемещений, но и для форм деформаций и напряжений одного порядка точности, что является важным при проектировании качественных датчиков.

## Список литературы

1. Аш Ж. *Датчики измерительных систем*. М.: Мир, 1992.
2. Горенштейн И. А. *Гидростатические частотные датчики первичной информации*. М.: «Машиностроение», 1976.
3. Леонтьев В.Л. Вариационно-сеточный метод решения задач о собственных колебаниях упругих трехмерных тел, связанный с использованием ортогональных финитных функций // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, 2002, № 3, с. 117.
4. Леонтьев В.Л., Риков Е.А. Интегральные преобразования, связанные с ортогональными финитными функциями, в задачах спектрального анализа сигналов // *Математическое моделирование*, 2006, т. 18, № 7, с. 93-100.