



# ДИССЕРТАЦИЯ на соискание академической степени МАГИСТРА

Тема: Исследование прочности и долговечности  
конструкции авиационного датчика вибраций МВ-38

Выполнил: Балобанов В.В., 6055/11  
Руководитель: проф. Боровков А.И.  
Соруководитель: асс. Клявин О.И.

## Оглавление.

1. Описание проблемы. Модель датчика вибрации МВ-38.
2. Описание и результаты вычислительного эксперимента.
3. Определение собственных частот и форм колебаний датчика.
4. Определение пластической зоны перед вершиной трещины.
5. Определение долговечности датчика МВ-38.

## Датчик вибраций МВ-38



Датчик вибрации МВ-38 –  
компрессионный  
пьезоакселерометр с  
цилиндрическими  
пьезоэлементами из керамики  
Синоксаль-49

### Технические характеристики:

Диапазон контролируемых частот: 10 – 3000 Гц

Диапазон измерения: 0.1 – 200g

Диапазон рабочих температур: –60 – 250°C

## Датчик вибраций МВ-38

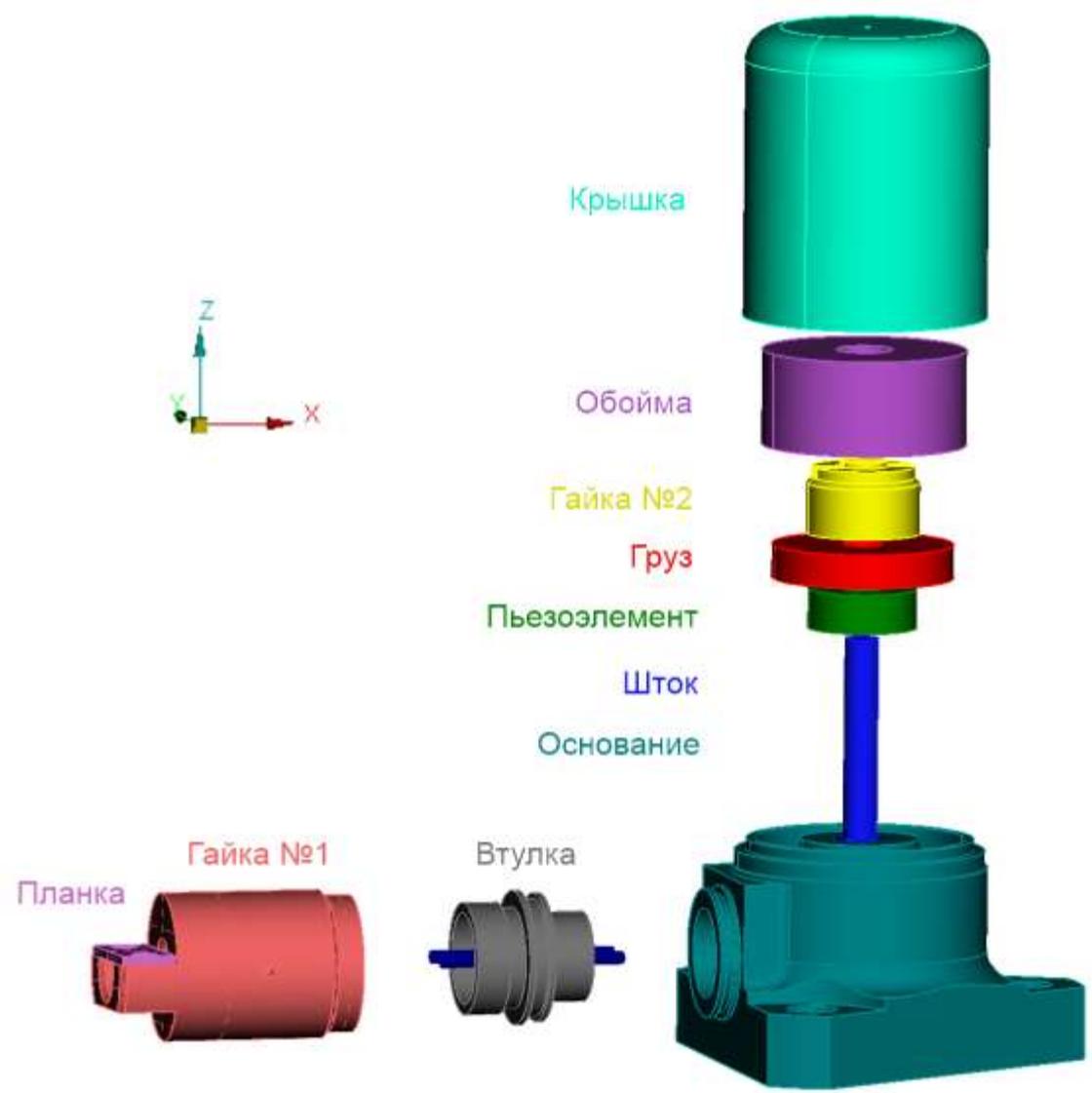


Задача датчика:  
Выделение вибраций  
малого уровня (до  $10g$ ) из  
широкополосного процесса  
вибраций.

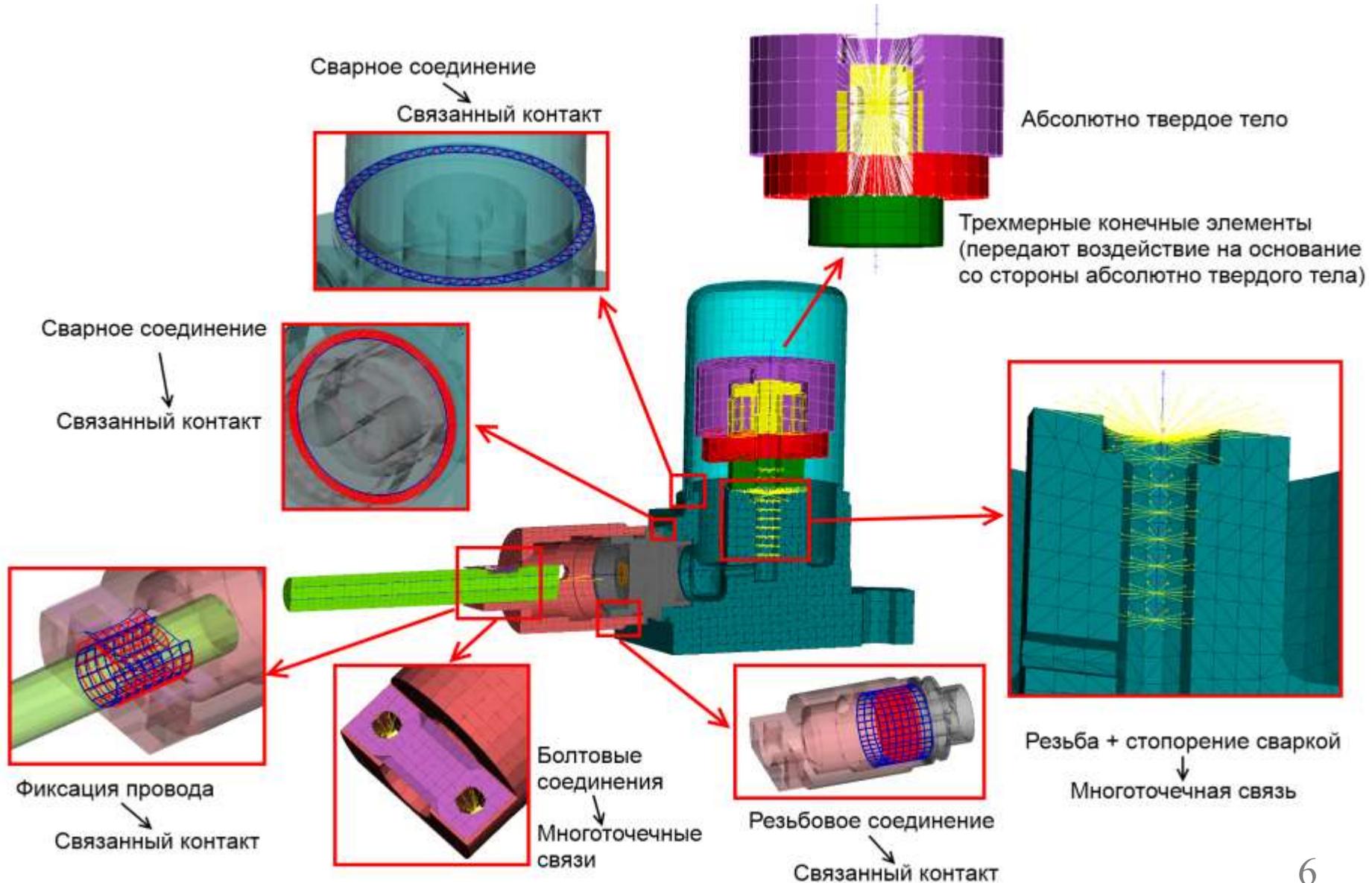
Частоты вибраций в  
двигателях – до 12000 Гц.  
Рабочая температура на  
поверхности – до  $400^{\circ}\text{C}$ .

Турбореактивный двигатель  
АИ-222-25

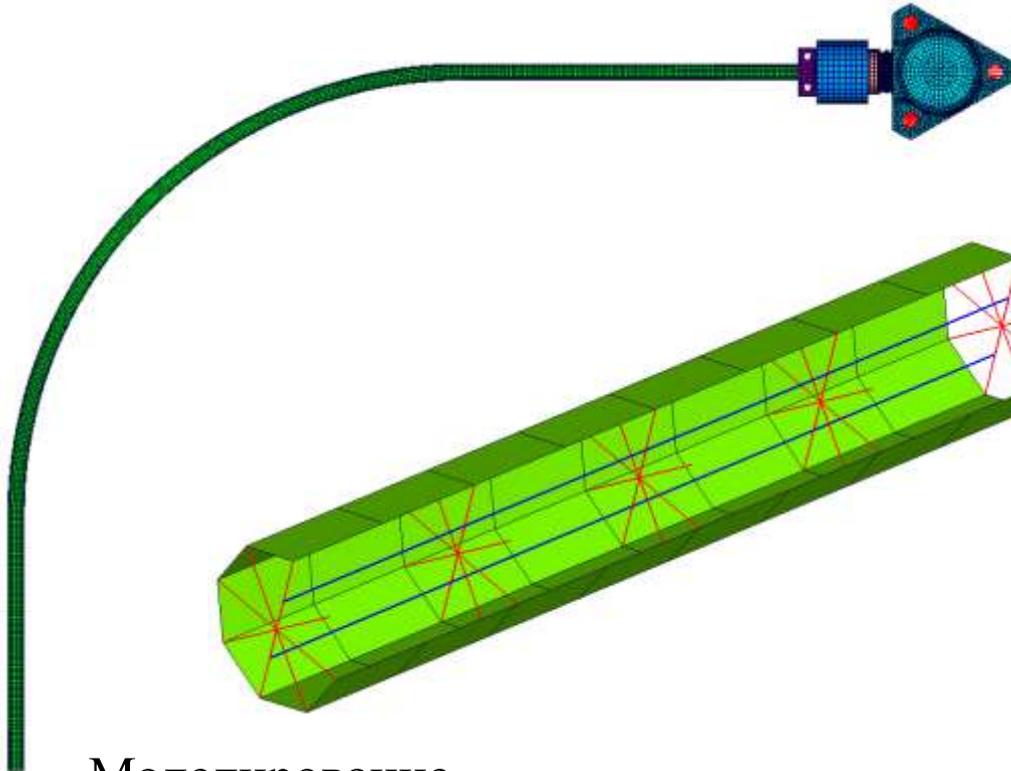
# CAD-модель



# Конечно-элементная модель

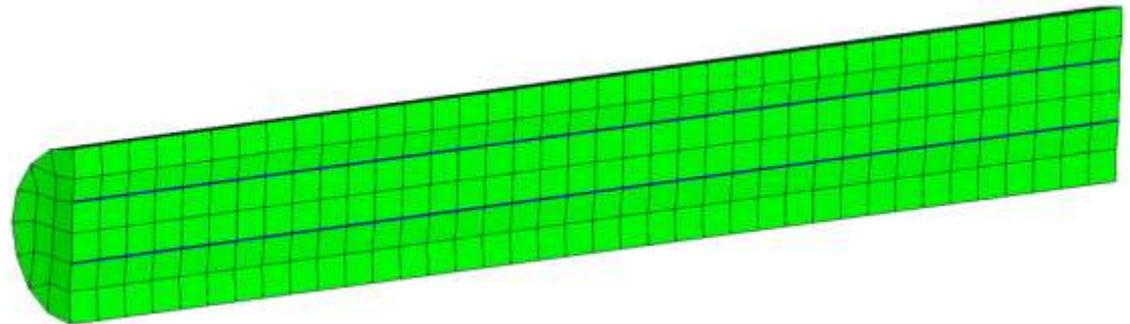


## Моделирование провода



Моделирование с помощью оболочечных элементов, через равные промежутки соединяемых жесткими связями с жилами, моделируемыми балочными элементами

Моделирование твердотельными элементами, некоторые из которых имеют общие узлы с балочными элементами жил



## Типы и количество элементов, использованных в модели

- **B31** (количество: **1011**) – двухузловые балочные элементы
- **S4R** и **S3R** (количество: **1262** и **52** соотв.) – оболочечные четырех- и трехузловые элементы с пониженным интегрированием
- **C3D8R** (количество: **48098**) – твердотельные гексагональные восьмиузловые элементы с пониженным интегрированием
- **C3B6** (количество: **7448**) – твердотельные шестиузловые элементы в форме треугольных призм
- **C3D4** (количество: **28948**) – твердотельные тетраэдрические четырехузловые элементы
- **SFM3D4R** и **SFM3D3** (количество: **1201**) – мембранные четырех- и трехузловые элементы

### Связи:

**MPC** (количество: **15**) – многоточечные жесткие связи

**TIE-contact** (количество: **6**) – связанные контакты

### Всего:

**88020** элементов, **76475** узлов, **233049** степеней свободы

## Материалы

Деталь	Материал	Е, ГПа	$\nu$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Основание, Хомут	10X18H11БЛ	194	0.28	7900
Втулка	12X18H9Т	180	0.28	7900
Штыри, Шток	36НХТЮ	130	0.28	7900
Изоляция	Стекло	70	0.23	2500
Гайка	ВТ1-0	112	0.32	4505
Планка, Крышка	12X18H10Т	198	0.28	7900
Провод	Из опыта	0.46	0.363	1370
Жилы	Из опыта	0.46	0.28	7900
Кер. шайбы	<b>Керамика</b> <b><math>Al_2O_3</math></b>	276	0.22	3600
Наполнитель обоймы	Резина	0.0075	0.45	1500

## Определение модуля Юнга провода

Эксперимент: Провод  $\rightarrow$  балка круглого сечения

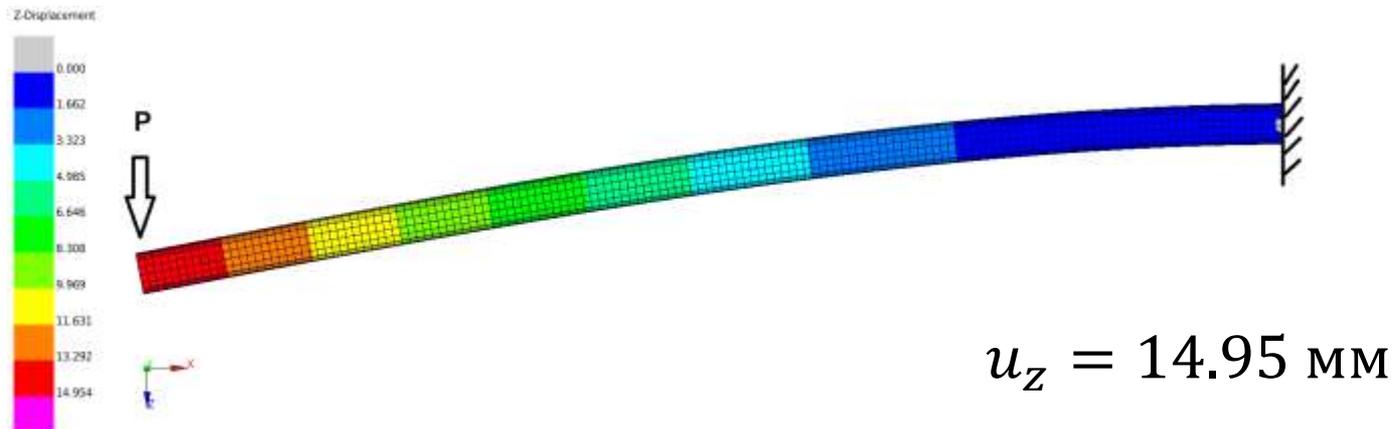
Вес груза:  $P = 0.2 \text{ Н}$

Момент инерции  $I = \frac{\pi d^4}{64} = 16.773 \text{ мм}^4$

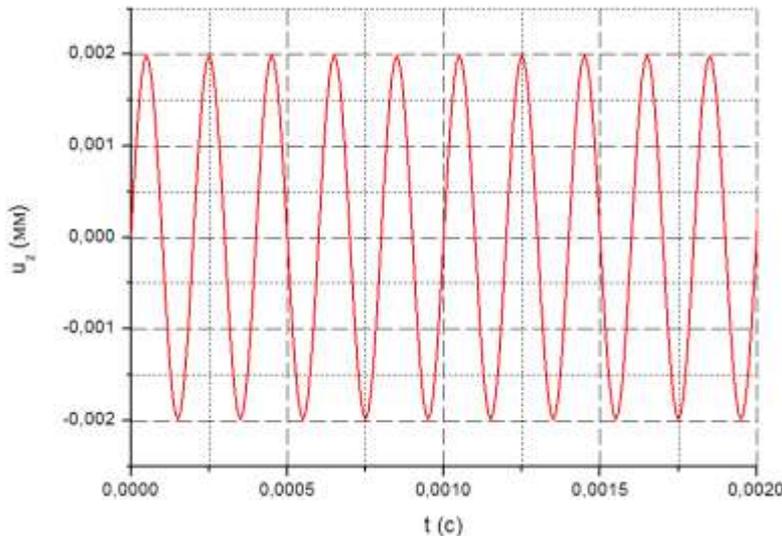
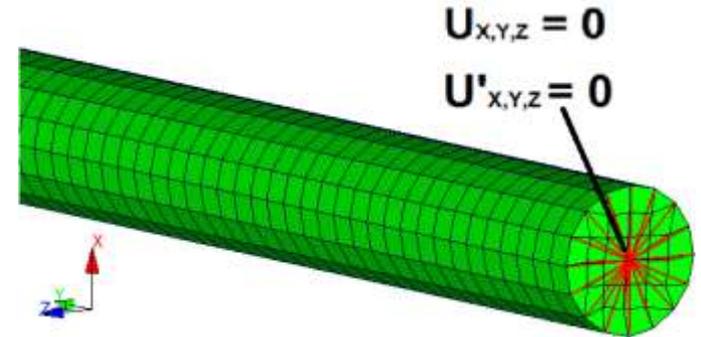
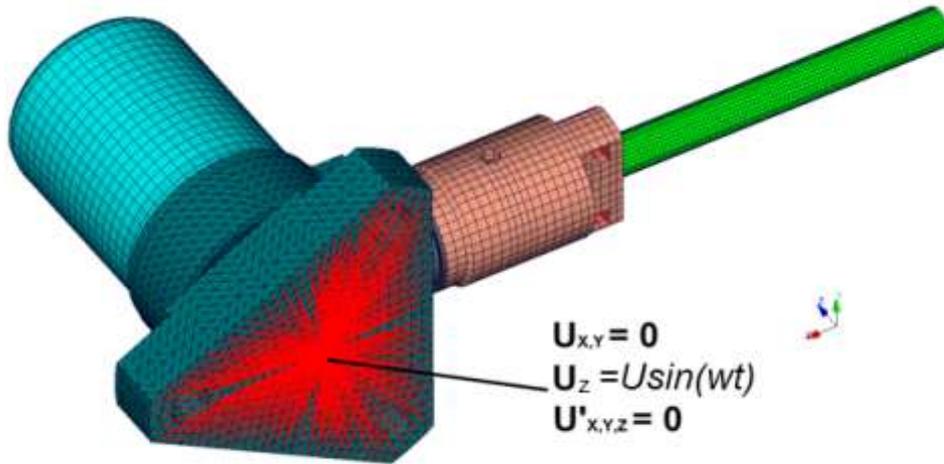
Длина балки  $L = 120 \text{ мм}$

Измеренный прогиб:  $u_z = 15 \text{ мм} \Rightarrow E = 460 \text{ МПа}$

Конечно – элементная постановка



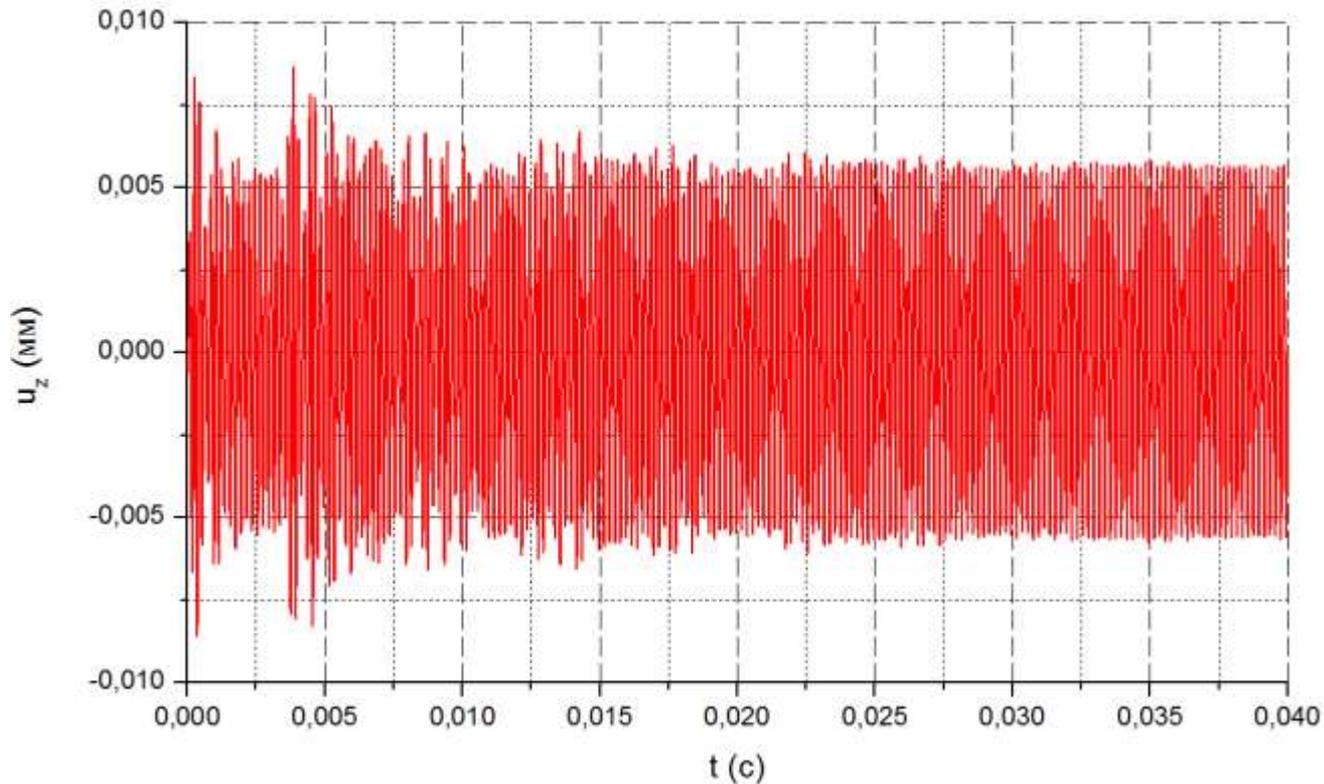
# Граничные условия



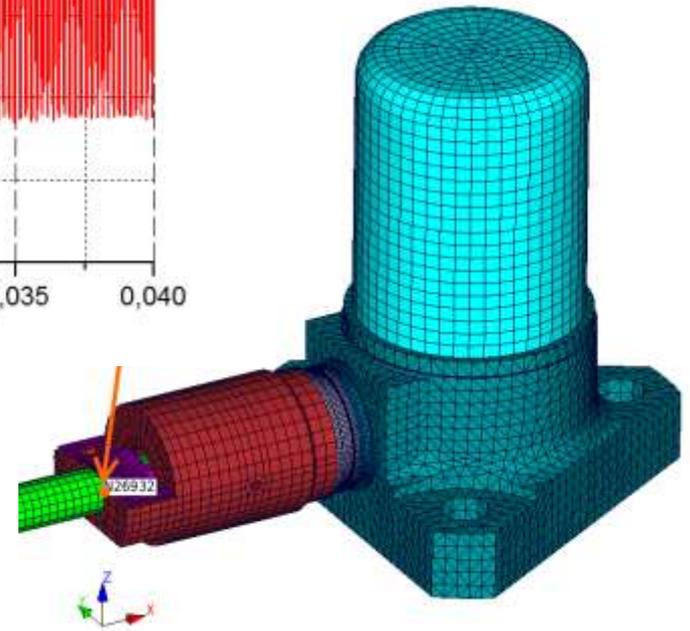
Перемещения  $U_z$  подобраны так, чтобы амплитуда ускорений равнялась  $A_z = 200g$

Пример: для частоты  $f = 5000$  Гц  
 $U = 0.002$  мм

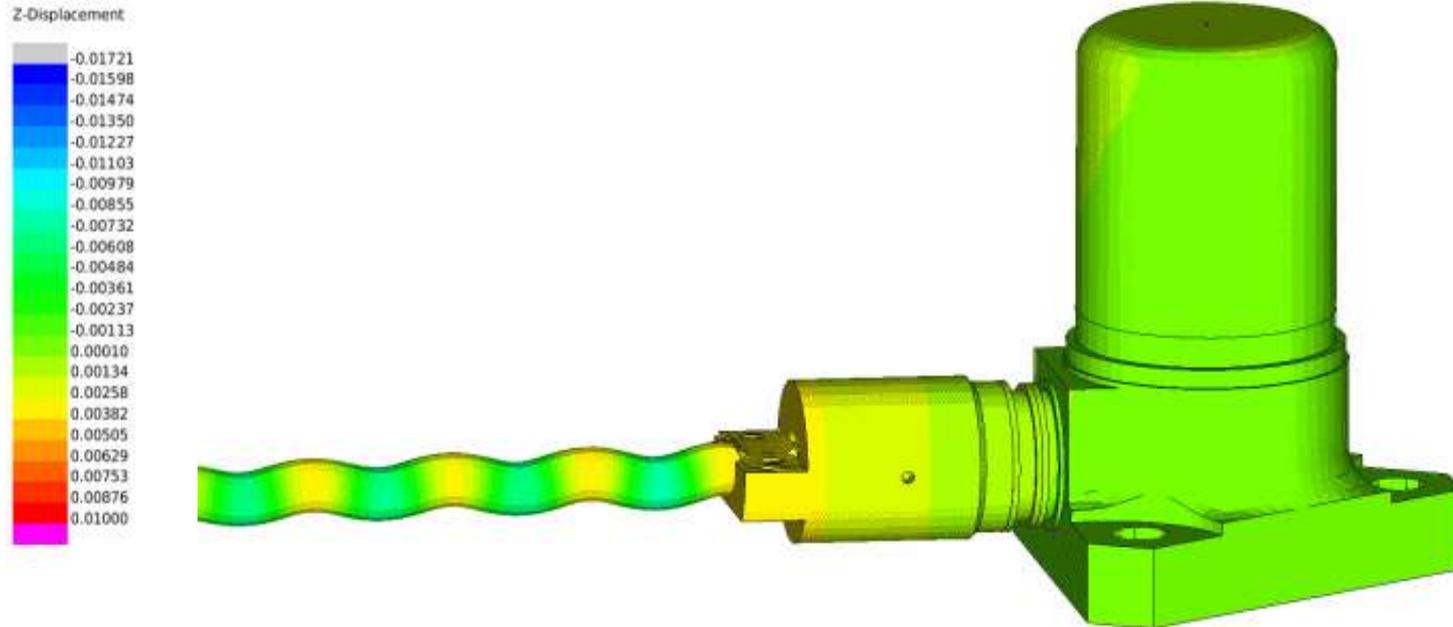
## Установившийся режим



Установившийся режим для расчетного случая с частотой  $f = 5000$  Гц наступает примерно после 0,03 секунды (150 циклов)

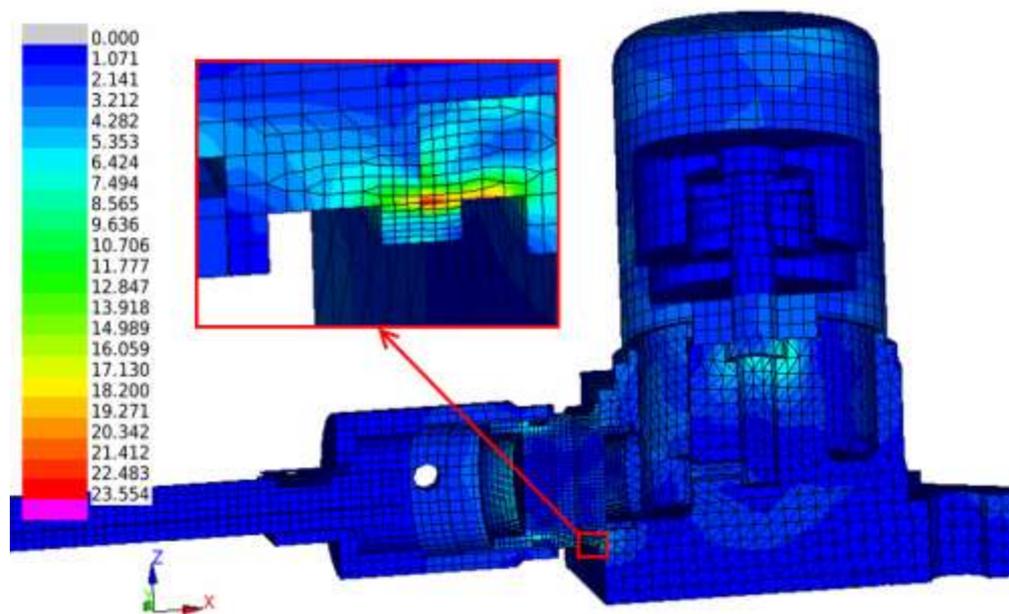


## Колебания датчика в установившемся режиме



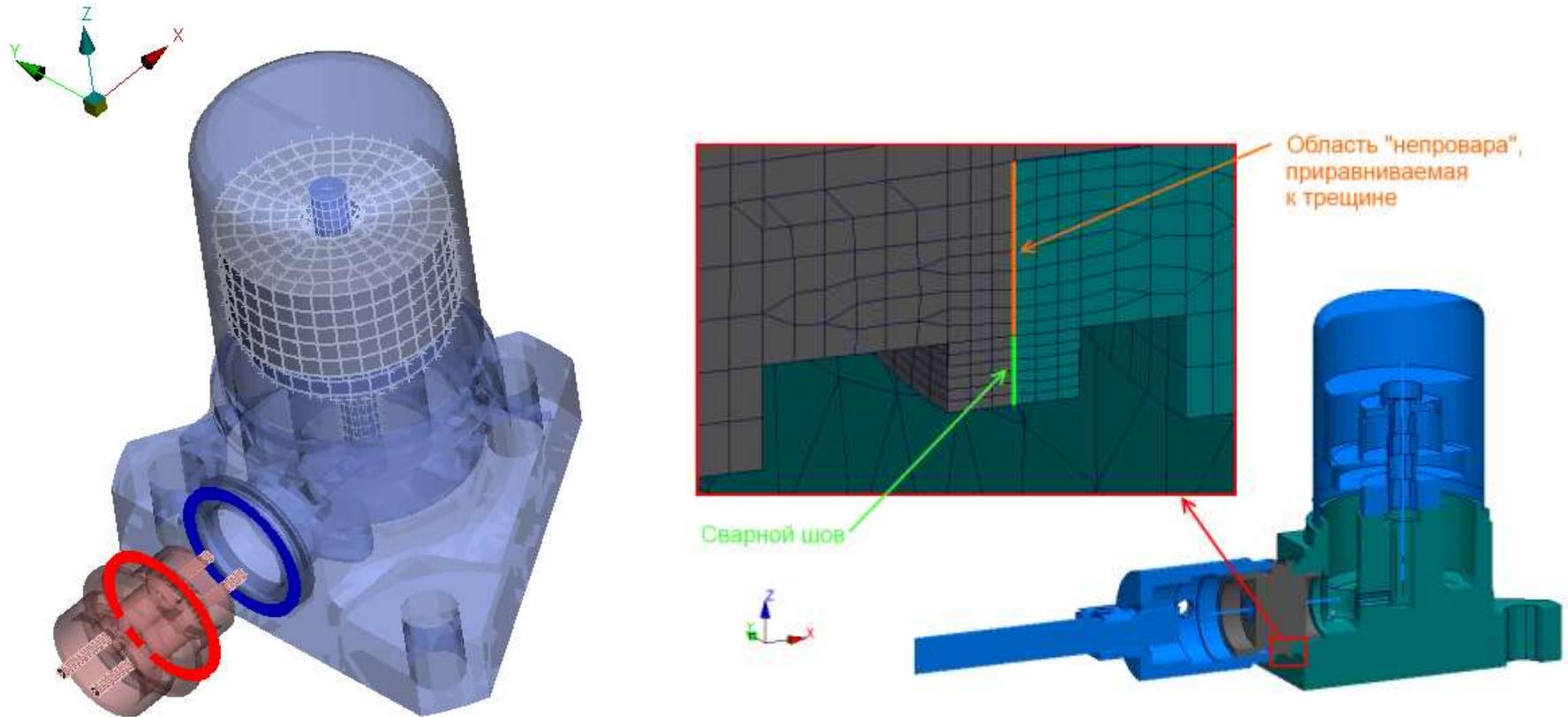
Поле перемещений  $u_z$  относительно нижней грани основания (Масштаб 100:1)

## Максимальные напряжения, наблюдаемые в установившемся режиме



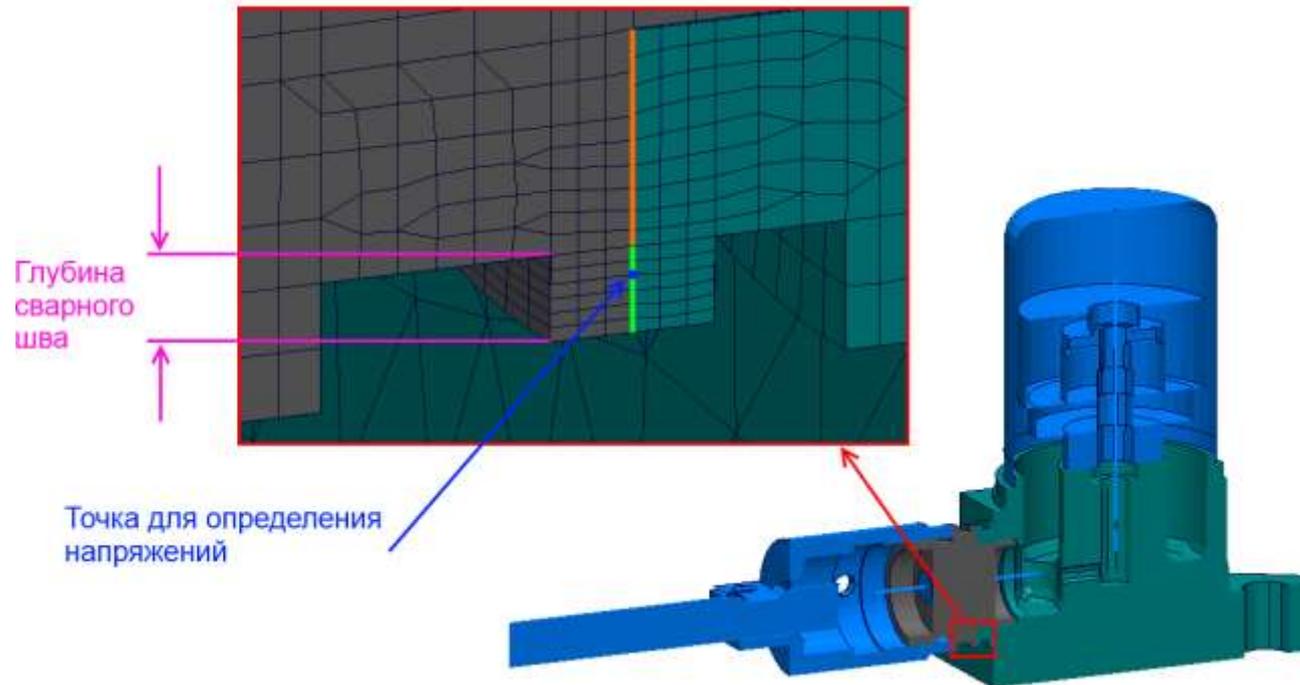
Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения  
возникают в нижней части сварного шва

## Сварное соединение между втулкой и основанием



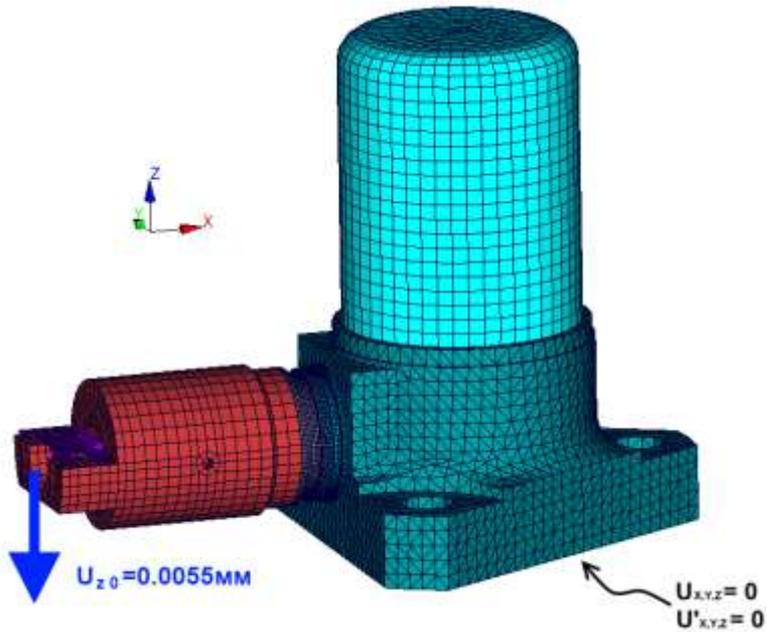
Технология соединения двух деталей с помощью аргонно-дуговой сварки не позволяет создать сварной шов на всей поверхности соприкосновения двух соединяемых деталей. В результате часть соприкасаемых поверхностей превращается в сварной шов, а часть остается свободной, образуя так называемый «непровар».

## Исследование сходимости

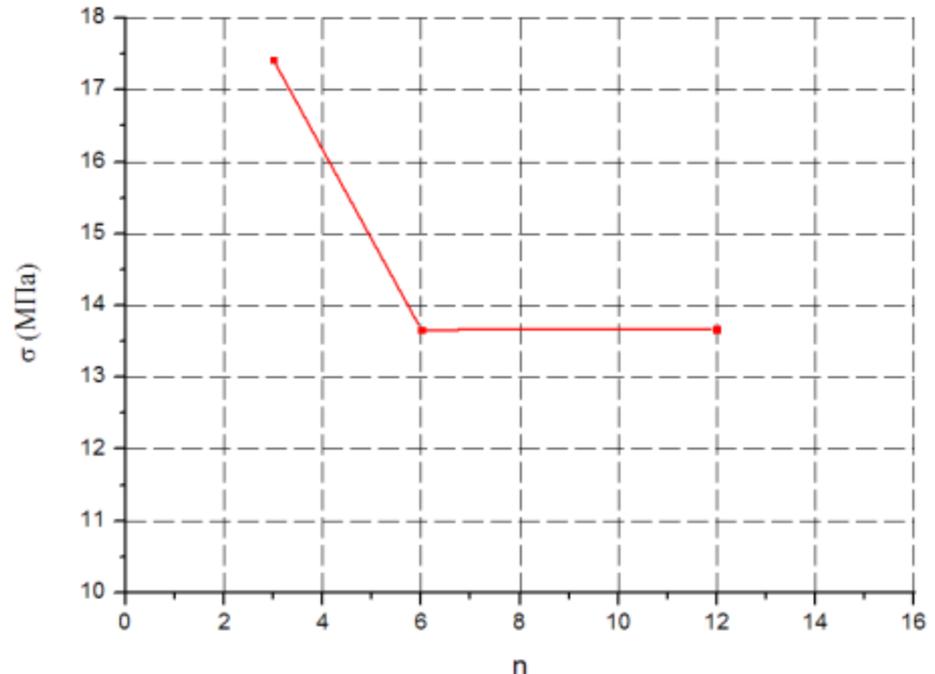


Исследуется сходимость по количеству элементов по глубине сварного шва. В точке, показанной на рисунке синим цветом, определяются эквивалентные по Мизесу напряжения.

## Исследование сходимости



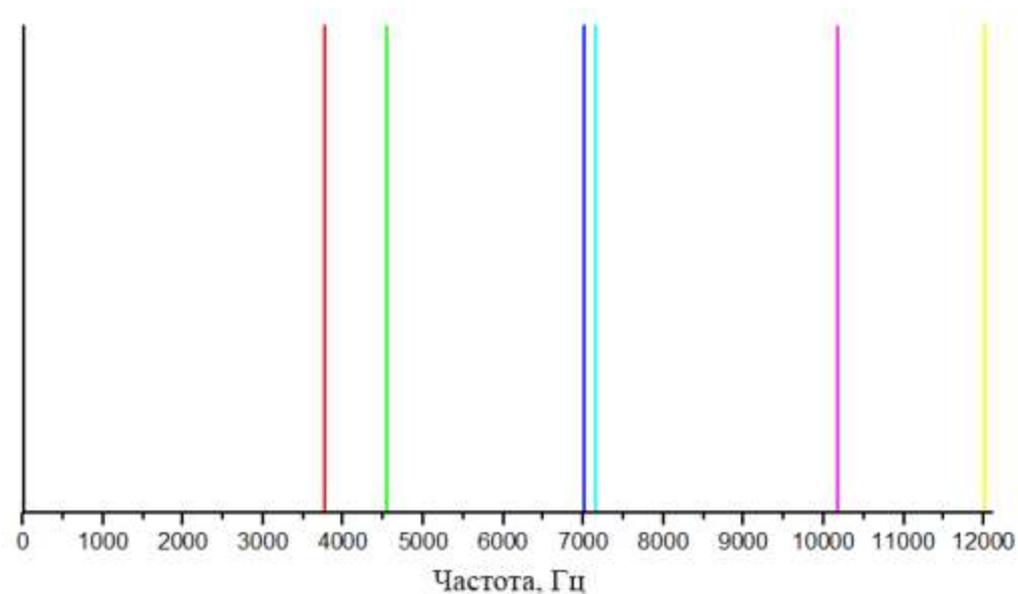
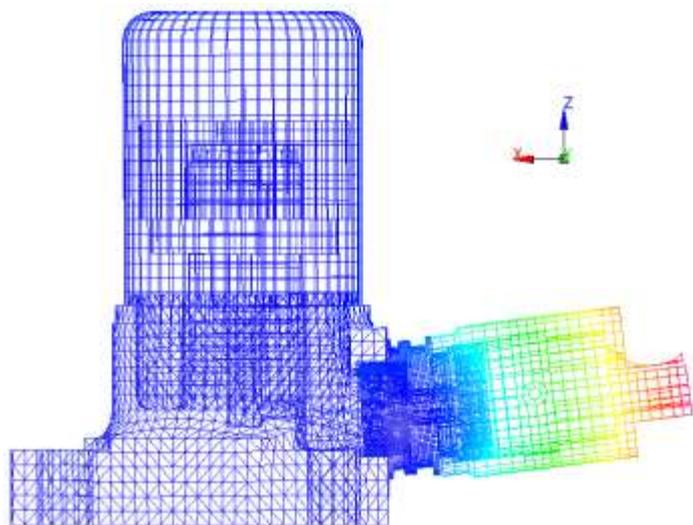
Исследование сходимости:  
решение ряда статических задач с  
разными конечно-элементными  
сетками.



В процессе исследования  
обнаружилась довольно быстрая  
сходимость по числу элементов вдоль  
сварного шва.  
Выбрана сетка с шестью элементами.

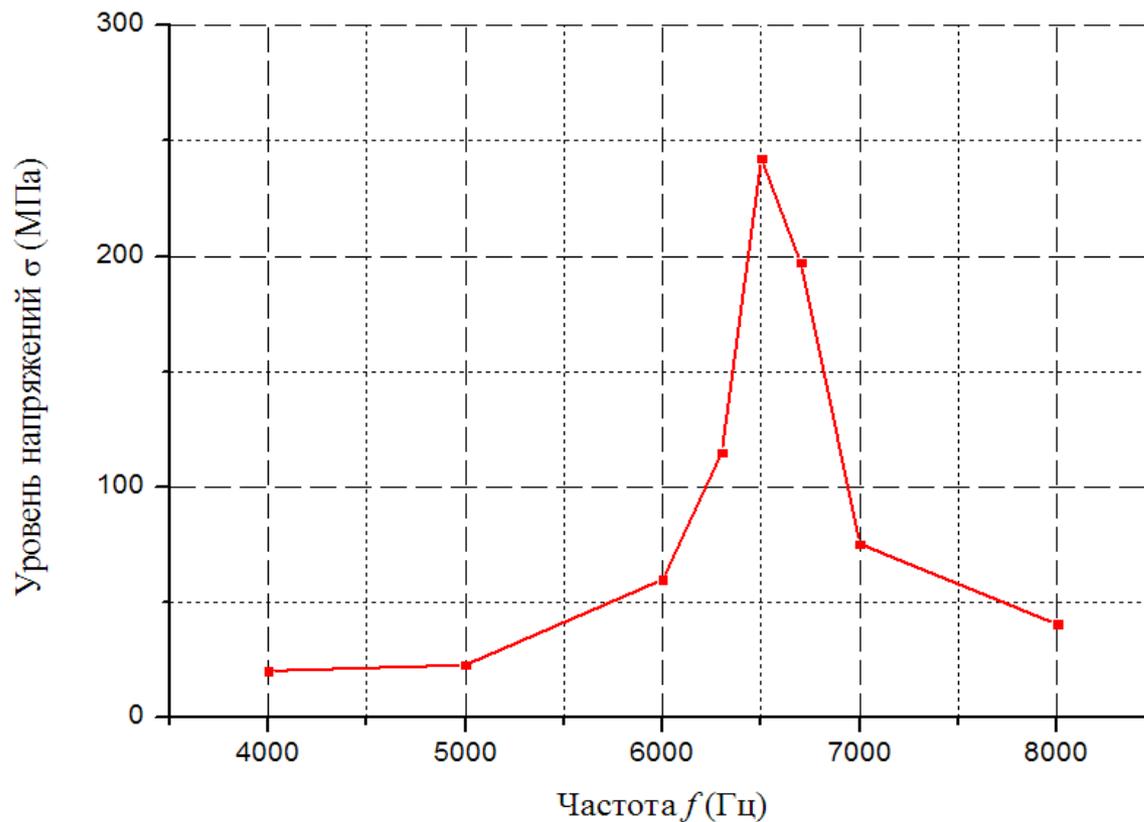
# Определение собственных частот

## Алгоритм Ланцоша



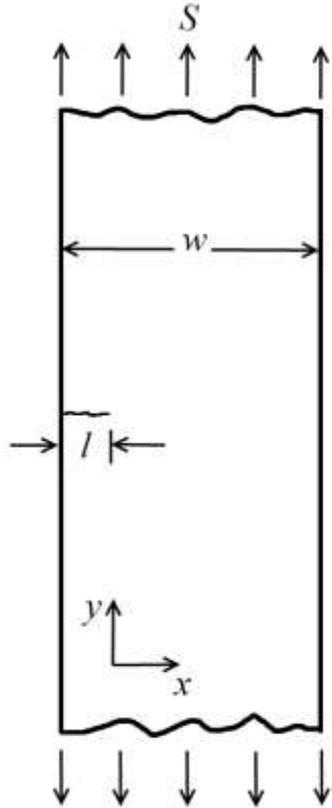
Собственная форма колебаний,  
совпадающая с рабочим режимом.  
Соответствующая собственная  
частота  $f = 7008$  Гц

## Амплитудно-частотная характеристика



Пик напряжений соответствует частоте 6500 Гц

## Определение зоны пластичности (модельная задача)



Плоское деформированное состояние:

$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2} (1 - 2\nu)^2$$

Формула Ирвина для определения зоны пластичности вдоль трещины

$K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений первого типа

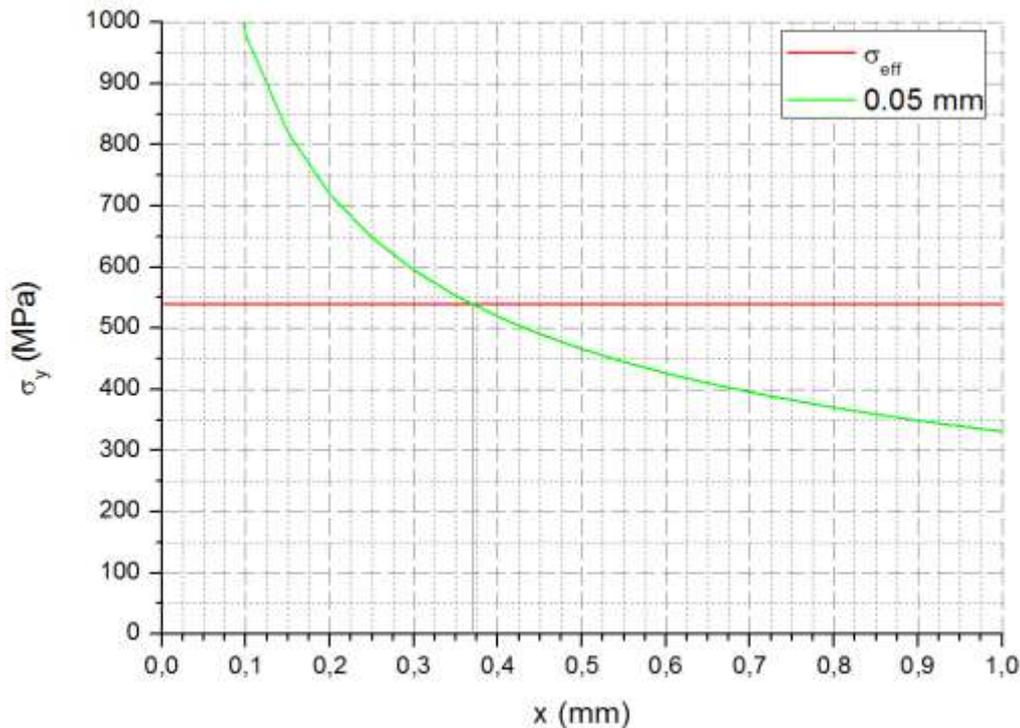
$K_I$  определяется двумя способами:

- Аналитическим, с использованием справочных формул

$$K_I = 833.69 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$

- Конечно-элементным, с использованием метода аппроксимации и экстраполяции на вершину трещины

$$K_I = 848.31 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$



Определение длины зоны  
пластичности с  
помощью графика:

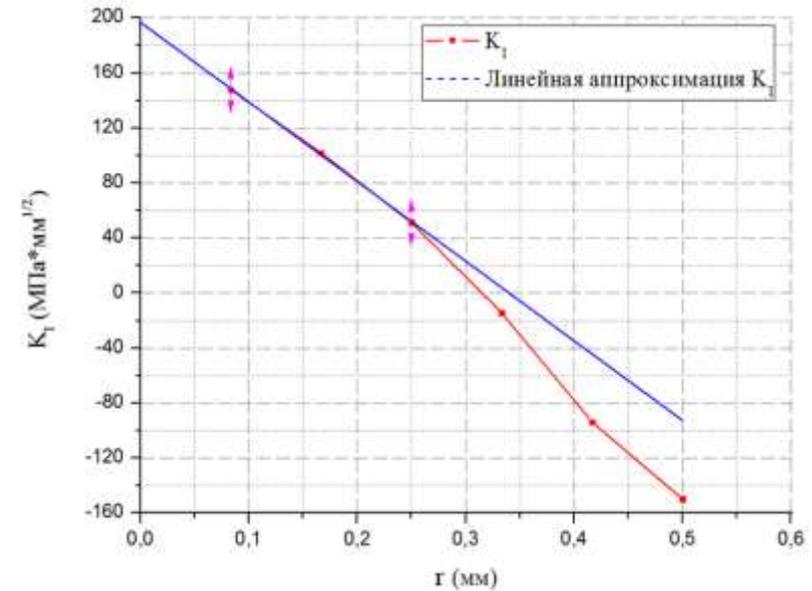
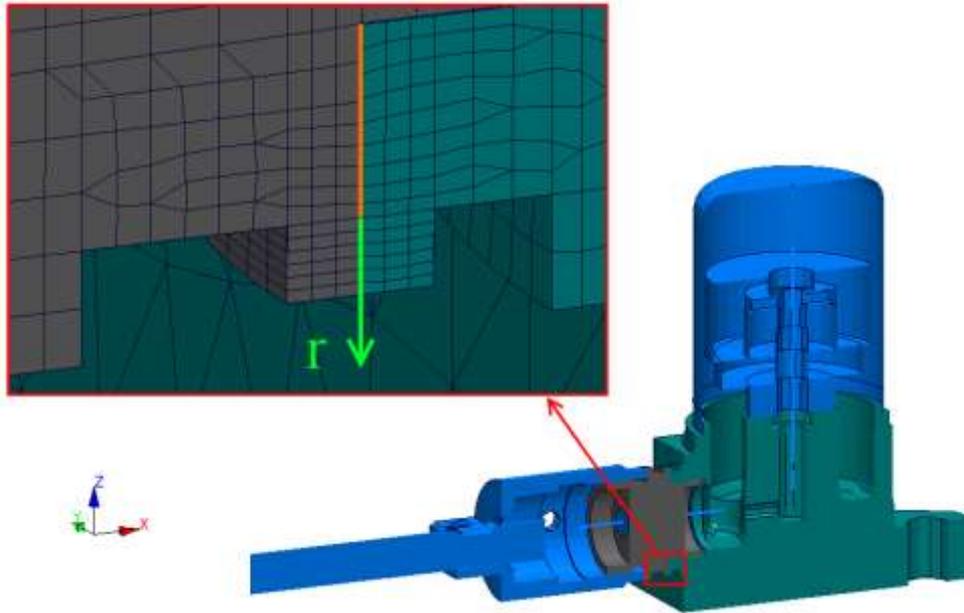
$$\sigma_{eff} = \sigma_T \chi$$

$\chi$  – коэффициент стеснения  
пластической деформации:

$$\chi = \frac{1}{1 - 2\nu} = 2.5$$

Метод	$r_p$ , мм	Отличие от аналитического решения, %
Аналитический метод	0.38	-
Графический метод	0.37	0.03
Метод с аппроксимацией коэффициента интенсивности	0.39	0.03

## Определение зоны пластичности, возникающей в сварном шве

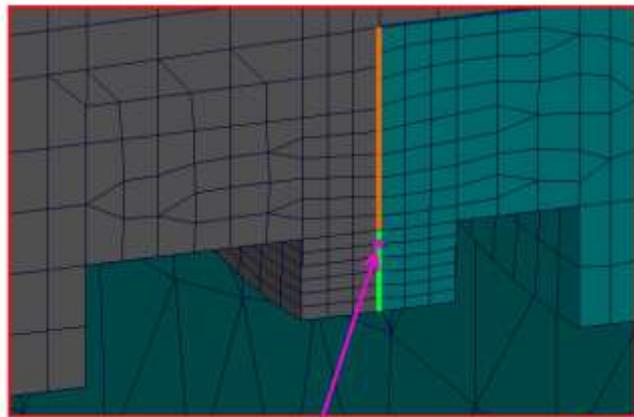
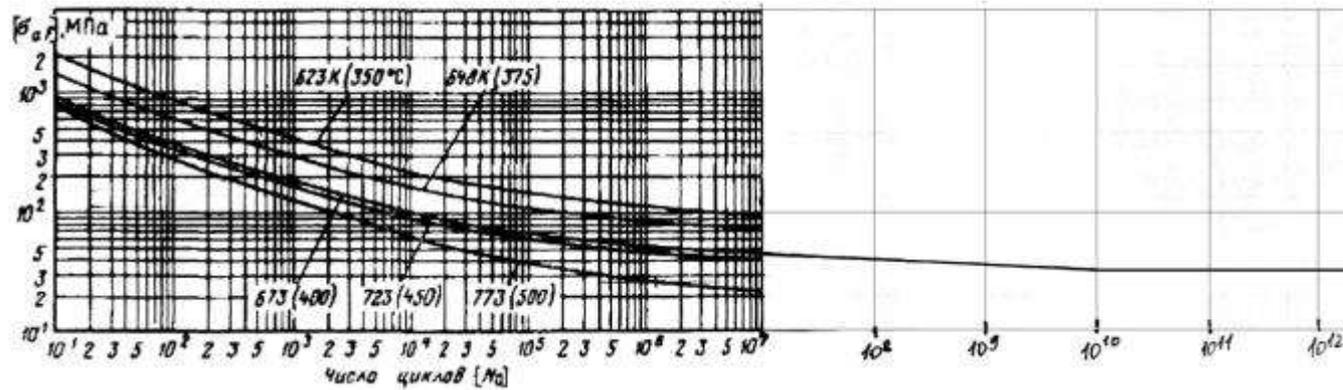


Коэффициент интенсивности  $K_I = \sigma_x \sqrt{2\pi r}$

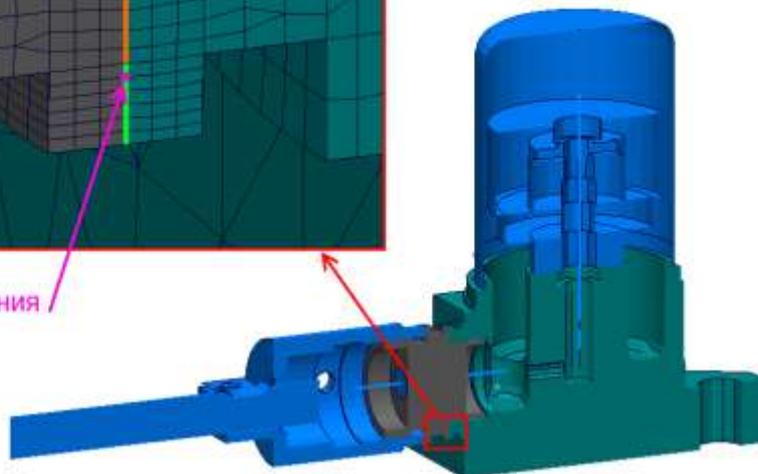
Длина пластической зоны за вершиной трещины вдоль ее оси  $r_p = 0.021$  мм

Длина зоны пластичности меньше размеров одного элемента (0.083 мм), следовательно пластические деформации локализованы около вершины трещины и использование линейной упругой теории допустимо.

# Оценка ресурса работы датчика по кривой усталости



Узел для определения результатов



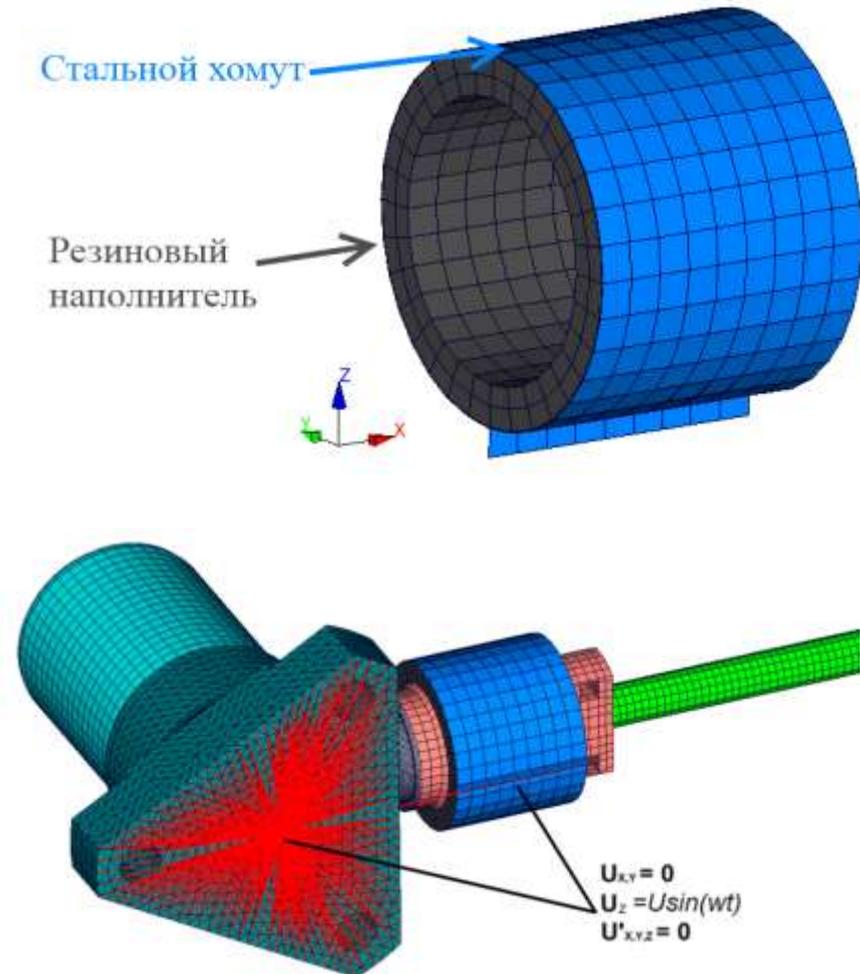
Эквивалентные по Мизесу напряжения  $\sigma = 175.6$  МПа

Число циклов работы датчика до разрушения  $\sim 2000$ , время работы – около 0.3 секунды

## Принятие мер по уменьшению уровня напряжений

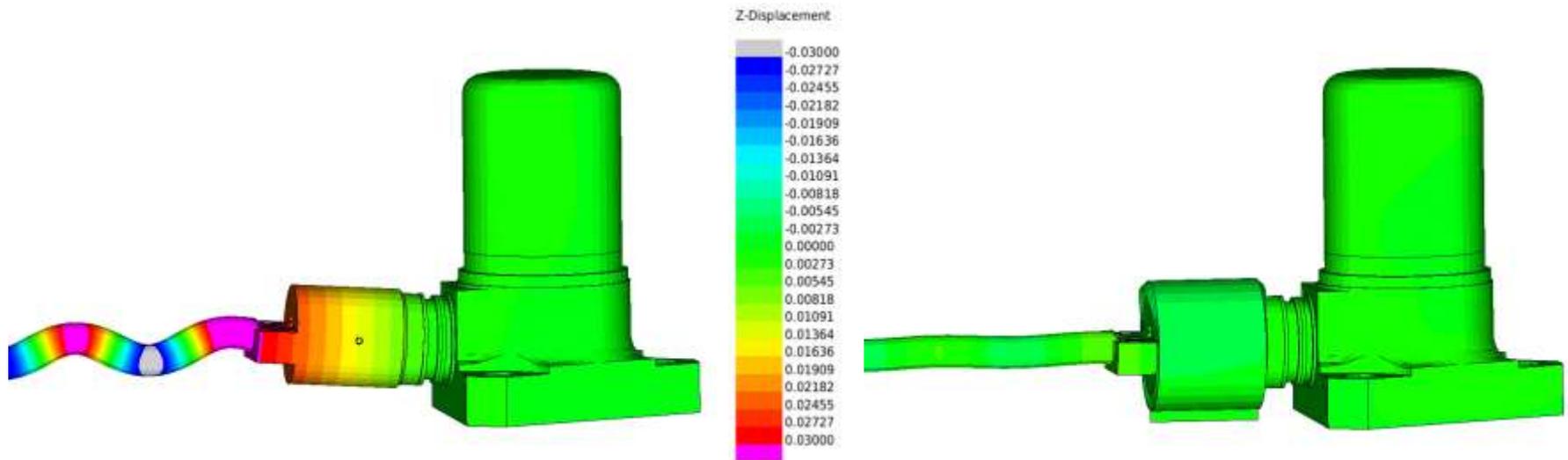
Для уменьшения напряжений необходимо снизить колебательные перемещения провода и гайки относительно основания датчика, не внося изменений в конструкцию. Для этих целей была использована обойма, представляющая собой стальной хомут с резиновым наполнителем, который одевается на гайку.

Хомут своей нижней частью крепится на ту же поверхность, что и основание датчика. В КЭ постановке на узлы нижней части хомута накладываются те же граничные условия, что и на нижнюю грань основания



## Сравнение модели датчика с обоймой и без неё

Поле перемещений  $u_z$  относительно нижней грани основания  
(Масштаб 50:1):



Напряжения в сварном шве

175.6 МПа

7.6 МПа

Время работы согласно кривой усталости

менее 1с

Значение лежит ниже кривой усталости  $\Rightarrow$   
разрушения не произойдет

## Оценка ресурса работы датчика по Пэрису

Формула Пэриса для скорости роста трещины:  $v = \frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m$

$\Delta K = K_{I_{max}} - K_{I_{min}}$  – размах коэффициента интенсивности в цикле

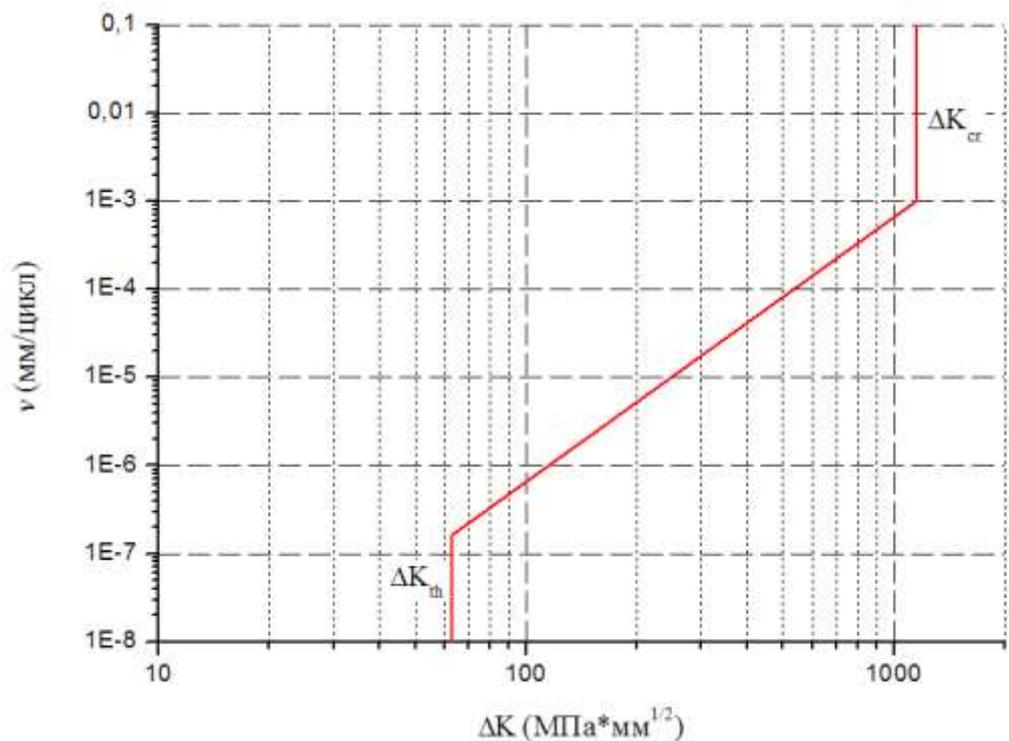
Значения коэффициентов:

$$m = 3$$

$$C = 5.21 \cdot 10^{-13} \left( \frac{E_{rt}}{E_{et}} \right)^3 = 6.52 \cdot 10^{-13}$$

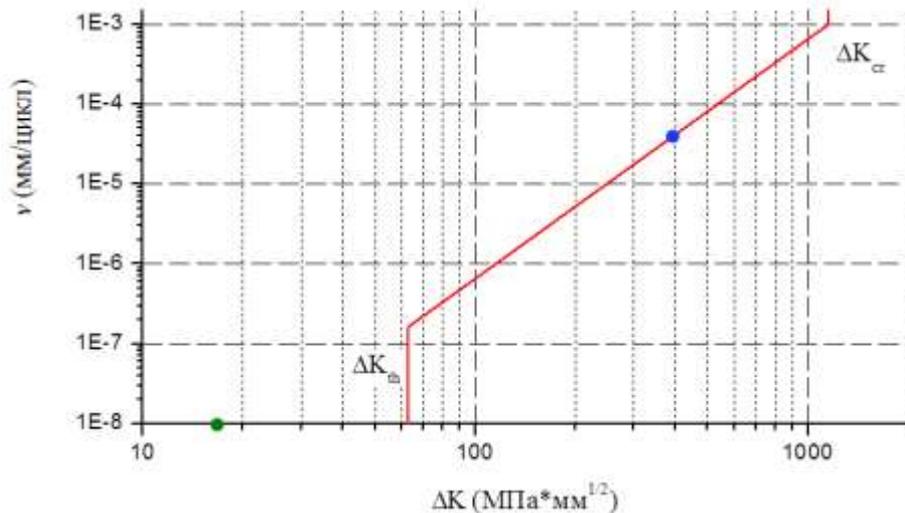
$$\Delta K_{th} = 63 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$

$$\Delta K_{cr} = 1154 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$$



## Оценка ресурса работы датчика по Пэрису

	Модель датчика без обоймы	Модель датчика с обоймой
Размах коэффициента интенсивности $\Delta K_I$ , МПа $\cdot \sqrt{\text{мм}}$	396.31	17.62
Отношение к пороговому размаху коэффициента интенсивности $\Delta K_I / \Delta K_{th}$ $\Delta K_{th} = 63 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{мм}}$	6.29	0.28



- Размах коэффициента интенсивности для модели датчика без обоймы
- Размах коэффициента интенсивности для модели датчика с обоймой



## Итоги

- В ходе проведения работы была создана подробная конечно-элементная модель датчика вибраций МВ-38.
- Поставлен и решен ряд динамических вибрационных и статических задач.
- Проведено определение собственных частот и амплитудно-частотной характеристики, выявлена наиболее опасная резонансная частота.
- Определены размеры зоны пластичности в окрестности сингулярной точки, доказана возможность применимости упругих свойств материалов без учета пластических, а так же линейной механики разрушений.
- Проведена оценка ресурса работы датчика вибраций двумя способами.
- Предложены эффективные меры по снижению напряжений, возникающих в сварном шве, не вносящие изменений в конструкцию серийно выпускаемого устройства.



Спасибо за внимание!