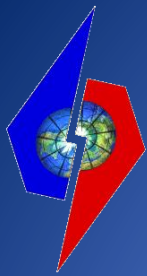


Методы динамического анализа ТС\*,  
в том числе, с учётом вязкоупругих демпферов,  
в программном комплексе **АСТРА-НОВА**.  
Верификация и апробация на реальных системах

*А.А. Аул, А.М. Белостоцкий, А.Л. Потапенко, К.И. Островский*  
ЗАО НИЦ СтаДиО, Москва

*\* ТС – трубопроводные системы*



# Актуальность

## Виды динамических нагрузок на ТС:

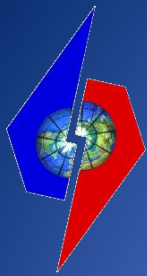
### *Внутренние:*

- запуск/остановка;
- скачкообразные и пульсационные изменения давления;
- гидравлический удар;
- взрыв оборудования;
- разрыв трубопровода;
- вибрации машин (насосов, компрессоров, ...).

### *Внешние:*

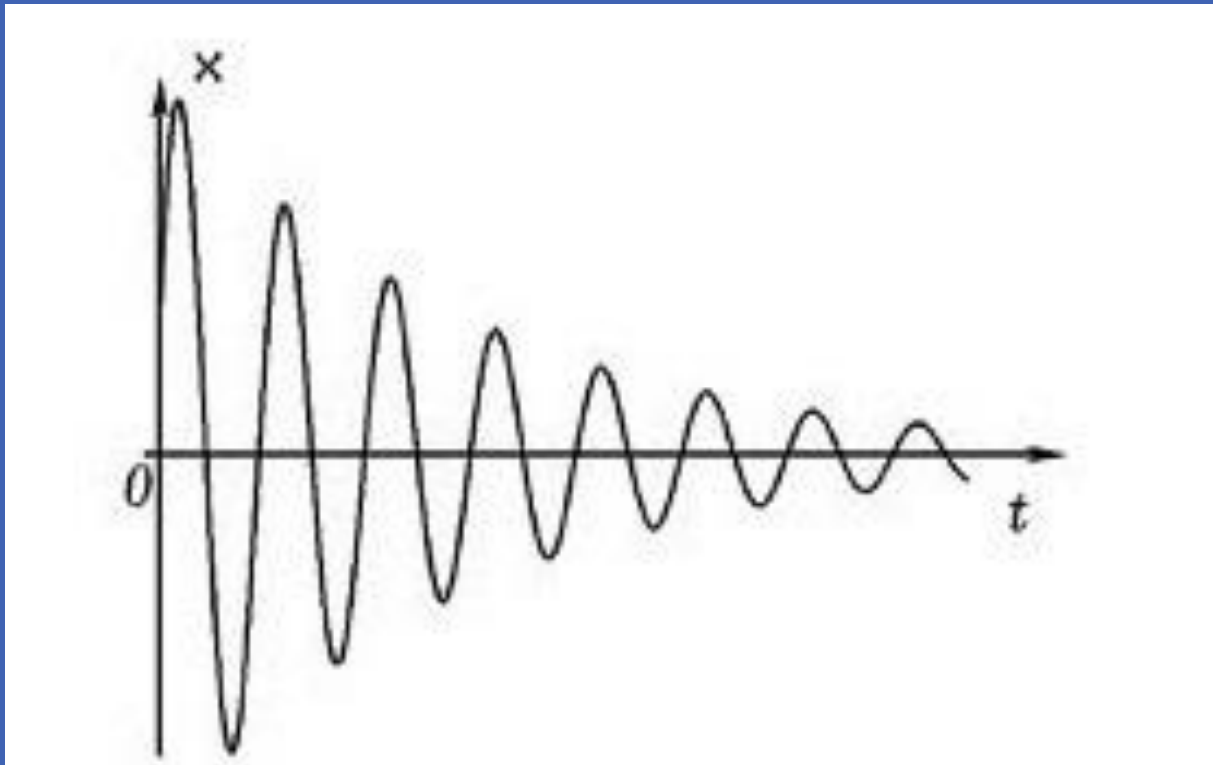
- ветровые (пульсационные) нагрузки;
- сейсмические воздействия;
- падения самолётов;
- взрывы.

Один из давних и эффективных способов снижения динамической реакции ТС - увеличение демпфирования

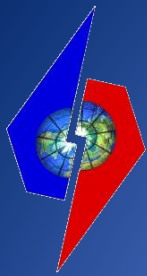


# Демпфирование

Демпфирование (damping) - рассеяние (диссипация) энергии, приводящее к затуханию колебаний, вплоть до полной их остановки



Величина демпфирования определяется, прежде всего, материалом, скоростью движения и частотой колебаний.



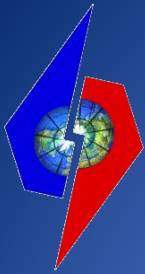
# Физические механизмы демпфирования

Демпфирование, не зависящее от свойств материала:

- вызванное акустическим излучением;
- вызванное переносом среды;
- вызванное трением;

Демпфирование, обусловленное свойствами материалов:

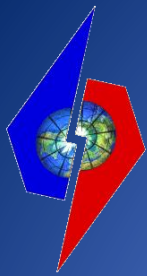
- перестройка атомарной структуры (процессы, связанные с дислокациями, зёрнами структуры, точечными дефектами, атомами примесей, фазовые процессы);
- температурные эффекты (рассеяние за счёт теплопередачи);
- электромагнитные эффекты (затраты энергии на смещение границ магнитных кристаллов в ферромагнетиках).



# Модели демпфирования

Существует множество способов математического моделирования демпфирования:

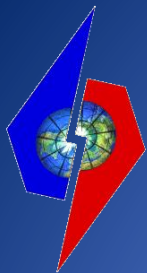
- Трение Кулона;
- Связанные задачи;
- Модели вязкого демпфирования;
  - ✓ - *линейная модель вязкого поршня;*
  - ✓ - модель Максвелла;
  - ✓ - модель Кельвина-Фойгта;
  - ✓ - модель стандартного линейного тела;
  - ✓ - обобщённая модель Максвелла;
  - ✓ - модель Бюргерса.
- ...



## Способы изменения демпфирующих свойств трубопроводных систем

Методы влияния на демпфирование трубопровода:

- Изменение материала изготовления деталей ТС;
- Изменение жесткостных и инерционных характеристик ТС;
  - ✓ изменение компоновки;
  - ✓ установка гасителей колебаний;
  - ✓ изменение видов соединения деталей.
- **Установка дискретных демпфирующих устройств  
– демпферов.**

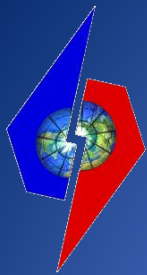


# Демпферы

Для повышения демпфирующих свойств трубопроводных систем используются *демпферы*.

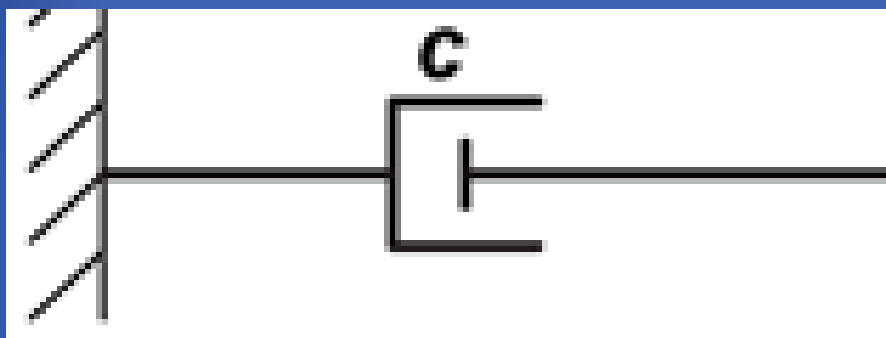
*Демпфер* - устройство для гашения (демпфирования) или предотвращения колебаний.





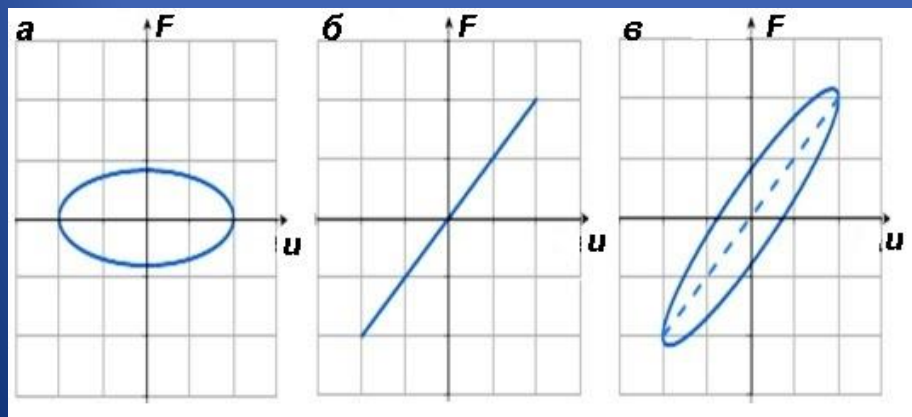
# Демпферы

Принцип действия демпфера заключается в необратимом переводе полученной им энергии колебательных движений в другие виды энергии (диссипация или рассеяние энергии).



Виды демпферов:

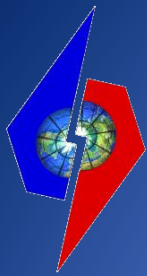
- жидкостные вязкоупругие демпферы;
- жидкостные/газовые демпферы;
- твердые вязкоупругие демпферы;
- металлические упругопластические демпферы;
- демпферы сухого трения;
- магнитные демпферы.



Гистерезисные кривые опор:

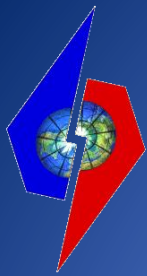
- а - вязкий демпфер;
- б - упругая опора (пружина);
- в - вязко-упругий демпфер (общий случай)





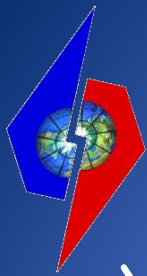
# Основные причины использования дискретных вязкоупругих демпферов

- ❑ низкие значения демпфирующих свойств материалов трубопроводных систем;
- ❑ невозможность отстройки от резонанса из-за плотного спектра собственных частот;
- ❑ невозможность повышения жёсткости трубопроводной системы из-за необходимости компенсации температурных расширений и чрезмерного возрастания динамических нагрузок на опорные конструкции;
- ❑ невозможность и/или нецелесообразность применения других видов гасителей колебаний.



## Достигаемые цели при применении демпферов в трубопроводных системах

- снижение пиковых амплитуд колебаний (амплитуды вблизи резонансных частот системы);
- снижение расчётных напряжений в элементах трубопровода и
- снижение нагрузок на опорно-подвесную систему и оборудование;
- повышение надёжности и продление ресурса существующих трубопроводных систем.



# Основное уравнение динамики

Уравнение движения относительно динамических степеней свободы в общей матричной форме

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

$[M]$  – матрица масс системы;

$[C]$  – матрица демпфирования системы;

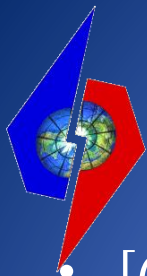
$[K]$  – матрица жёсткости системы;

$\{F(t)\}$  – вектор заданных нагрузок системы;

$\{\ddot{u}\}$  – искомый вектор ускорений;

$\{\dot{u}\}$  – искомый вектор скоростей;

$\{u\}$  – искомый вектор перемещений.



## Важные частные задачи/случаи основного уравнения динамики

- $[C] = 0, \{F(t)\} = 0$  - определение значимой части собственных частот и форм колебаний (частичная проблема собственных значений)

$$[M][\Phi][\Omega^2] - [K][\Phi] = 0$$

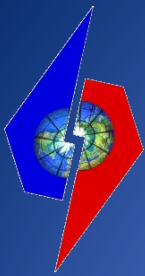
- Гармонические/установившиеся колебания (вибрации):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F_{max}e^{i\phi}\}e^{i\theta t}$$

Предполагается изменение векторов амплитуд перемещений по гармоническому закону вида  $\{u\} = \{u_{max}e^{i\phi}\}e^{i\theta t}$

- Неустановившиеся колебания:

изменение вектора нагрузок  $\{F(t)\}$  произвольно во времени.  
Решается полное уравнение динамики (1).



# Учёт демпфирования

Матрица демпфирования системы пропорциональна массе и жёсткости системы (модель Релея) и выражается через соответствующие матрицы

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

где:

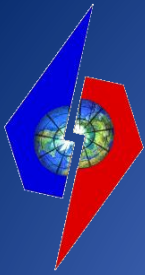
$\alpha$  – коэффициент пропорциональности массы,  $c^{-1}$ ;

$\beta$  – коэффициент пропорциональности жёсткости  $c$ .

В случае наличия **сосредоточенных демпферов** в системе, матрица демпфирования дополняется матрицей сосредоточенных демпферов

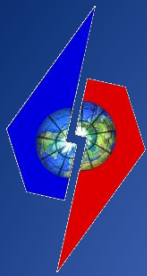
$$[C] = [C] + [C_{оп}]$$

$[C_{оп}]$  – диагональная матрица демпфирования, соответствующая сосредоточенным демпферам по динамическим степеням свободы



# Методы решения динамических задач

- **Определение значимых собственных частот и форм колебаний**
  - ✓ Блочный метод Ланцоша;
  - ✓ Итераций подпространства (Subspace);
  - ✓ Методы для несимметричных матриц и/или затуханием.
- **Гармонические/установившиеся воздействия**
  - ✓ Разложение по собственным формам (суперпозиция форм);
  - ✓ Полный (прямой) метод.
- **Неустановившиеся колебания**
  - ✓ Разложение по собственным формам (суперпозиция форм);
  - ✓ **Прямое интегрирование уравнений движения;**
    - Явные методы
      - Метод центральных разностей
    - **Неявные методы**
      - Метод Ньюмарка
      - Метод ННТ (Хильбера-Хьюза-Тейлора)
      - Метод Вилсона
      - Метод Хаболта



# Реализованные методы решения динамических задач

Неустойчившиеся колебания - прямое интегрирование  
*АСТРА-СЕЙСМ+, АСТРА-ДИН+*

Уравнение движения и матрица демпфирования выражаются через матрицу податливости  $[D]$ , обратную матрице жёсткости  $[K]$ . Матрицы  $[M]$  и  $[C]$  и матрица податливости  $[D]$  строятся относительно динамических степеней свободы системы

$$\begin{aligned} [D][M]\{\ddot{u}\} + [D][C]\{\dot{u}\} + [D][K]\{u\} &= [D]\{F(t)\} \\ [D][C] &= \alpha[D][M] + \beta[D][K] + [D][C_{оп}] \end{aligned}$$

Обозначим

$$[\tilde{M}] = [D][M]; [\tilde{C}] = [D][C]; [\tilde{K}] = [D][K] = [E]; [\tilde{C}_{оп}] = [D][C_{оп}]; \{\tilde{F}(t)\} = [D]\{F(t)\}$$

где

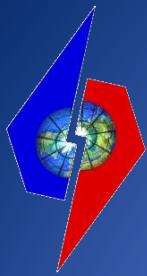
$[E]$  - единичная матрица.

Тогда

$$\begin{aligned} [\tilde{M}]\{\ddot{u}\} + [\tilde{C}]\{\dot{u}\} + [\tilde{K}]\{u\} &= \{\tilde{F}(t)\} \\ [\tilde{C}] &= \alpha[\tilde{M}] + \beta[\tilde{K}] + [\tilde{C}_{оп}], \end{aligned}$$

а «эффективная» матрица жёсткости

$$[\hat{K}] = [\tilde{K}] + a_0[\tilde{M}] + a_1[\tilde{C}]$$



# Реализованные методы решения динамических задач

## Неустойчившиеся колебания – вариант метода Ньюмарка

Начальные условия в момент времени  $t_0$   $\{t_0 \mathbf{u}\}; \{t_0 \dot{\mathbf{u}}\}; \{t_0 \ddot{\mathbf{u}}\}$

На каждом шаге  $t + \Delta t$  по времени вычисляется эффективная нагрузка

$$[{}^{t+\Delta t}\widehat{\mathbf{F}}] = [{}^{t+\Delta t}\widetilde{\mathbf{F}}] + [\widetilde{\mathbf{M}}](a_0 \{t \mathbf{u}\} + a_2 \{t \dot{\mathbf{u}}\} + a_3 \{t \ddot{\mathbf{u}}\}) + [\widetilde{\mathbf{C}}](a_1 \{t \mathbf{u}\} + a_4 \{t \dot{\mathbf{u}}\} + a_5 \{t \ddot{\mathbf{u}}\})$$

Перемещения на шаге  $t + \Delta t$  получаются из решения системы уравнений

$$[\widehat{\mathbf{K}}]\{t+\Delta t \mathbf{u}\} = [{}^{t+\Delta t}\widehat{\mathbf{F}}]$$

Ускорение и скорость на шаге  $t + \Delta t$  вычисляются как

$$\begin{aligned} \{t+\Delta t \ddot{\mathbf{u}}\} &= a_0 (\{t+\Delta t \mathbf{u}\} - \{t \mathbf{u}\}) - a_2 \{t \dot{\mathbf{u}}\} - a_3 \{t \ddot{\mathbf{u}}\} \\ \{t+\Delta t \dot{\mathbf{u}}\} &= \{t \dot{\mathbf{u}}\} + a_6 \{t \ddot{\mathbf{u}}\} + a_7 \{t+\Delta t \ddot{\mathbf{u}}\} \end{aligned}$$

Коэффициенты  $a_0 - a_7$  вычисляются по формулам:

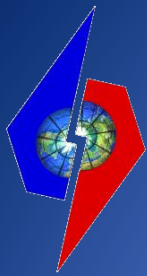
$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}; a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}; a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}; a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1; a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1; a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right); a_6 = \Delta t(1 - \delta); a_7 = \delta \Delta t$$

Параметры  $\alpha$  и  $\delta$  принимаются  $\delta \geq 0,5$ ,  $\alpha \geq 0,25(0,5 + \delta)^2$ . Значения параметров  $\alpha$  и  $\delta$  по умолчанию  $\delta = 0,5$ ,  $\alpha = 0,25$ .  $\Delta t$  - шаг интегрирования по времени.

Скорости  $\{t+\Delta t \dot{\mathbf{u}}\}$  и ускорения  $\{t+\Delta t \ddot{\mathbf{u}}\}$  в сечениях, соответствующих динамическим степеням свободы системы и вычисленные на каждом шаге по времени, используются для получения квазистатических сосредоточенных нагрузок, равных  $\{F(t)\} - ([\mathbf{M}]\{t+\Delta t \ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{t+\Delta t \dot{\mathbf{u}}\})$ .

Искомые перемещения, усилия, напряжения во всех сечениях суперэлементной модели от действия полученных квазистатических нагрузок определяются по суперэлементному алгоритму метода перемещений в сочетании с методами начальных параметров и прогонки (**АСТРА-НОВА**).





# Реализованные методы решения динамических задач

## Установившиеся колебания - полный метод АСТРА-ВИБР+

Вектор нагрузок определяется в комплексной форме как:

$$\{F(t)\} = \{F_{max}e^{i\phi}\}e^{i\theta t}$$

$$\{F\} = \{F_{max}(\cos \phi + i \sin \phi)\}e^{i\theta t}$$

$$\{F\} = (\{F_1\} + i\{F_2\})e^{i\theta t}$$

где:

$F_{max}$  - амплитуда нагрузки;

$\phi$  - сдвиг фаз (рад);

$\theta$  - возбуждающая круговая частота (рад/с);

$t$  - время воздействия, с;

$i$  - мнимая единица;

$\{F_1\} = \{F_{max} \cos \phi\}$  - действительная часть вектора нагрузок;

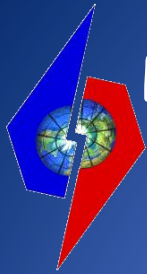
$\{F_2\} = \{F_{max} \sin \phi\}$  - мнимая часть вектора нагрузок.

Вектор перемещений  $\{u\}$  выражается аналогично вектору нагрузок  $\{F\}$  следующим образом:

$$\{u\} = \{u_{max}e^{i\phi}\}e^{i\theta t}$$

где:

$u_{max}$  - амплитуда перемещений, м;



# Реализованные методы решения динамических задач

## Установившиеся колебания – полный метод

Итоговое матричное уравнение может быть представлено в форме

$$[\tilde{K}]\{u\} = \{\tilde{F}\}$$

где

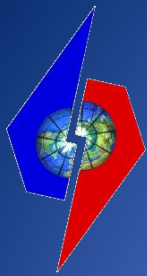
$$[\tilde{K}] = -\Theta^2[\tilde{M}] + i\Theta[\tilde{C}] + [E]$$

$[E]$  - единичная матрица;

$$\begin{aligned}\{\tilde{u}\} &= \{u_1\} + i\{u_2\} \\ \{\tilde{F}\} &= \{\tilde{F}_1\} + i\{\tilde{F}_2\}\end{aligned}$$

Полученное итоговое матричное уравнение решается относительно  $\{\tilde{u}\}$  известными методами линейной алгебры либо «в лоб», либо для расширенной действительной матрицы. Амплитуды виброскоростей  $\{\dot{u}\}$  и виброускорений  $\{\ddot{u}\}$  в сечениях, соответствующих динамическим степеням свободы системы и вычисленные для каждой возбуждающей частоты, используются для получения амплитуд квазистатических сосредоточенных нагрузок, равных  $\{F(t)\} - ([M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\})$ .

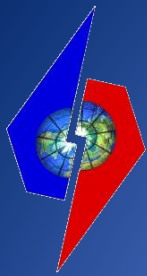
Искомые амплитуды перемещений, усилий, напряжений во всех сечениях суперэлементной модели от действия полученных амплитуд квазистатических нагрузок определяются суперэлементному алгоритму метода перемещений в сочетании с методами начальных параметров и прогонки.



# Программный комплекс АСТРА-НОВА

## Особенности численной/программной реализации

- Реализован метод *прямого интегрирования* уравнений движения с целью адекватного учёта сосредоточенных демпферов (что невозможно при расчёте методом разложения по собственным формам из-за неучёта сосредоточенного демпфирования при суперпозиции колебаний по собственным формам системы);
- Построение и решение уравнения движения с использованием, вместо матрицы жёсткости, матрицы податливости, сформированной относительно динамических степеней свободы;
- Получение перемещений во всех сечениях расчётной суперэлементной модели трубопроводной системы (включая сечения без динамических степеней свободы) из решения статической задачи от действия квазистатических сосредоточенных нагрузок на каждом шаге по времени, приложенных по динамическим степеням свободы.



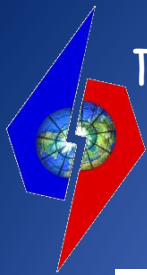
# Программный комплекс **АСТРА-НОВА**

## Реализующие расчётные модули

**АСТРА-ВИБР+** – расчет на вибропрочность для режимов установившихся вынужденных колебаний. Предусмотрено два вида расчета: определение допускаемых амплитуд (нормировка) виброперемещений по каждой учитываемой собственной форме и оценка амплитуд виброперемещений, напряжений и нагрузок, вибропрочности и долговечности при заданных вибродинамических нагрузках;

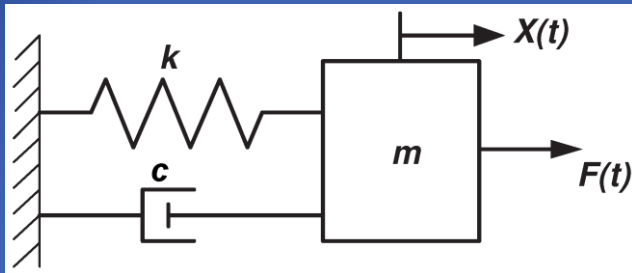
**АСТРА-СЕЙСМ+** – расчет на сейсмические воздействия, заданные одно- или многокомпонентными спектрами ответа (линейно-спектральный подход) или ответными акселерограммами (интегрирование по времени) на отметках крепления, с учетом всех значимых собственных частот и форм колебаний системы, а также вклада высших форм. Реализованы также расчет на «высокочастотное» воздействие и автоматизированный режим рациональной расстановки и учета сейсмоопор. Результаты: сейсмические перемещения, ускорения, усилия, нагрузки и напряжения, оценка сейсмостойкости;

**АСТРА-ДИН+** – расчет неустановившихся вынужденных колебаний при заданных динамических нагрузках для различных переходных и аварийных режимов эксплуатации (открытие-закрытие клапанов, пропуск снарядов и т.п.)

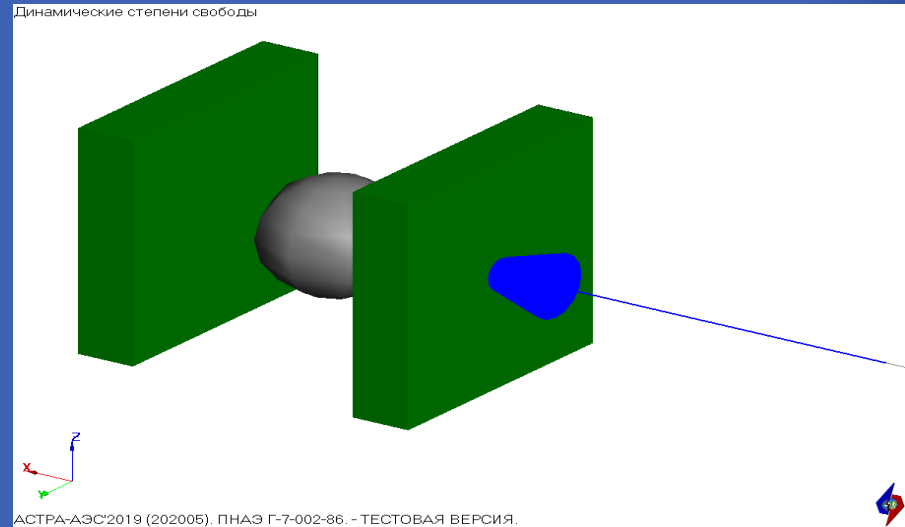


# Пример 1 - Пружинно-демпферная опора с сосредоточенной массой, нагруженная сосредоточенной периодической нагрузкой

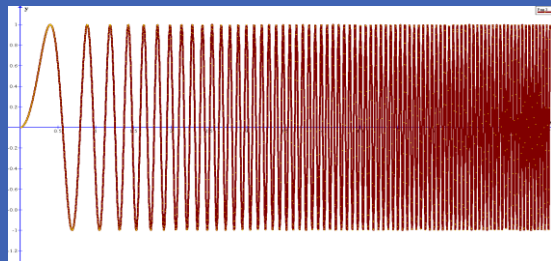
Расчётная схема



Расчётная модель (АСТРА-НОВА)



Нагрузка



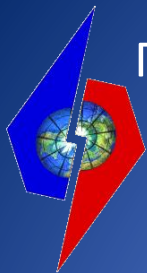
Параметры

## Характеристики пружинно-демпферной опоры

Жёсткость, кН/м	100
Демпфирование, кН*с/м	1
Масса, т	0,1

## Параметры нагрузки

Амплитуда возмущающей силы, кН	100
Возмущающая частота, Гц	переменная, прямо пропорционально зависит от времени
Закон изменения приложенной нагрузки	$F(t) = 100 \cdot \sin(10 \cdot t \cdot  t )$



# Пример 1 – Пружинно-демпферная опора с сосредоточенной массой, нагруженная сосредоточенной периодической нагрузкой

Перемещения сосредоточенной массы на пружинно-демпферной опоре во времени 0-7 с, м

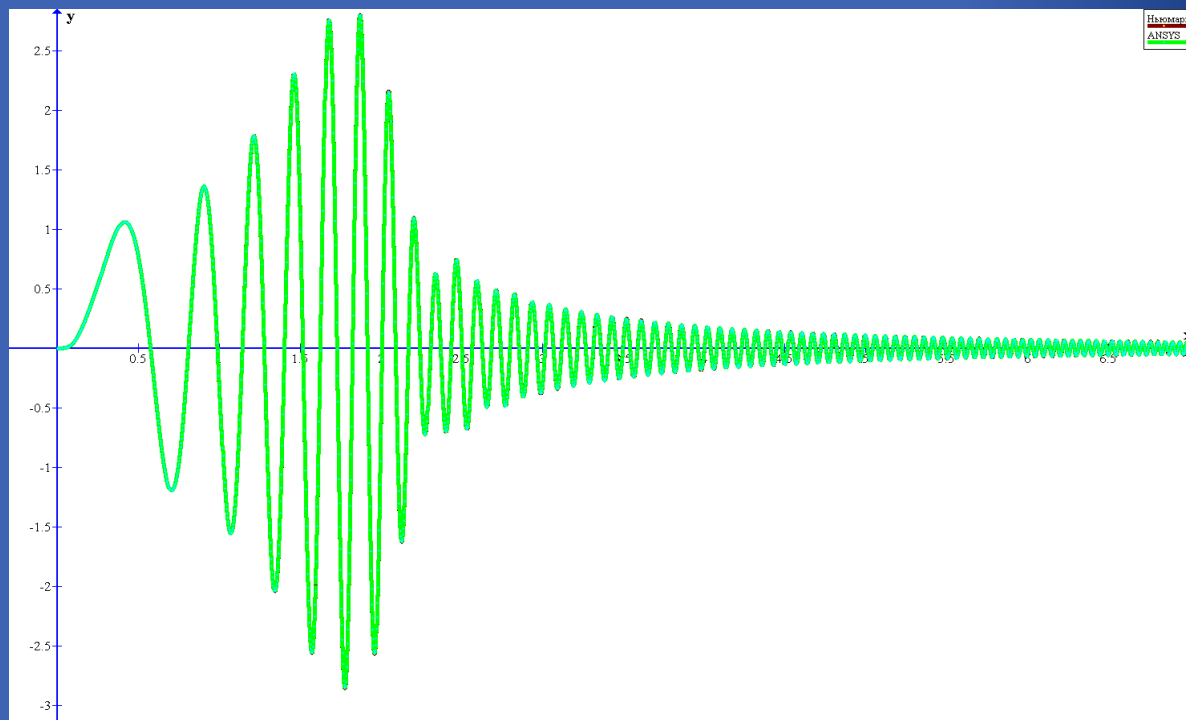
Параметры расчёта

$\Delta t = 0.001\text{с}$  - шаг интегрирования по времени

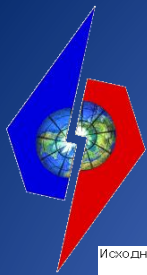
Время счёта  $t = 7\text{ с}$

Параметры устойчивости метода

Ньюмарка  $\alpha = 0,25$ ,  $\delta = 0,5$

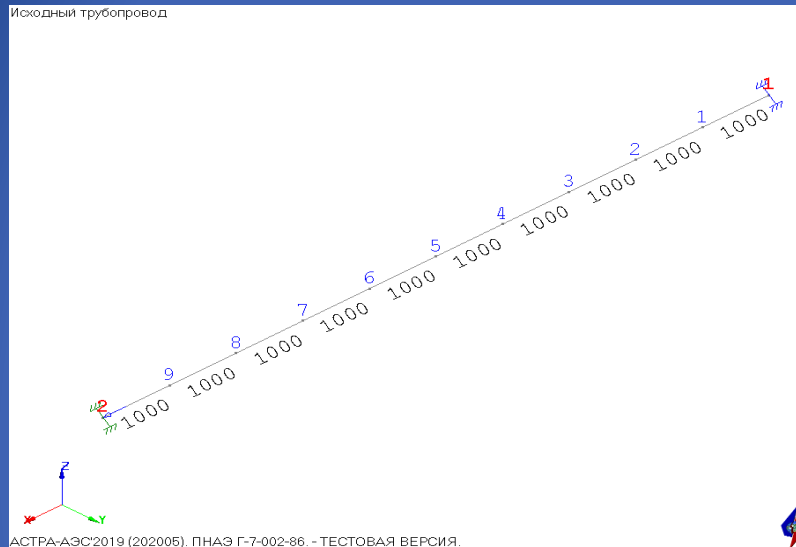


	Перемещения, Ux, м	
	минимум	максимум
АСТРА-НОВА 202005	-2.857539	2.804783
ANSYS*	-2,857539	2,804783
$\delta, \%$ (АСТРА vs ANSYS)	0	0



# Пример 2 – Стержень под действием внезапно снимаемой сосредоточенной силы

Расчётная модель (АСТРА-НОВА)

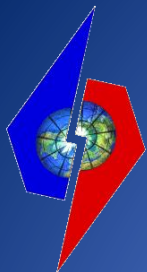


## Динамическая модель (АСТРА-НОВА)



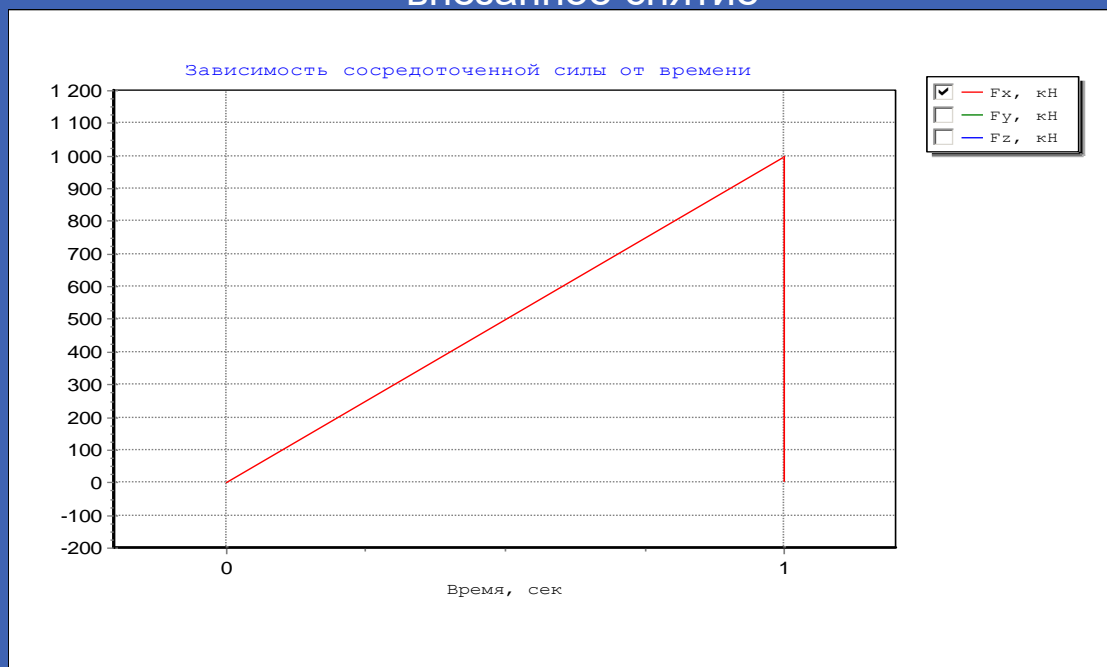
### Характеристики расчётной модели

Длина стержня, м	10
Поперечное сечение - кольцо	Труба 325x16
Модуль упругости, МПа	200000
Коэффициент Пуассона	0,3
<b>Граничные условия</b>	
Защемление (заделка) одного из концов	
Вязкоупругий демпфер на консольном конце, Н*с/м	100
Погонная масса стержня, кг/м	1529.05



## Пример 2 – Стержень под действием внезапно снимаемой сосредоточенной силы

Статическая нагрузка, кН. В диапазоне 0-1 с приложение нагрузки, в момент 1 с внезапное снятие



### Параметры нагрузки

Направление – вдоль оси стержня

Предварительно приложенная и внезапно снимаемая осевая статическая нагрузка на консольный конец стержня, кН

1000

### Параметры расчёта

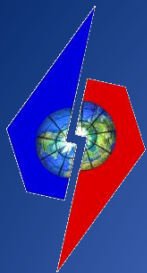
Шаг интегрирования по времени, с

0.001

Время счёта, с

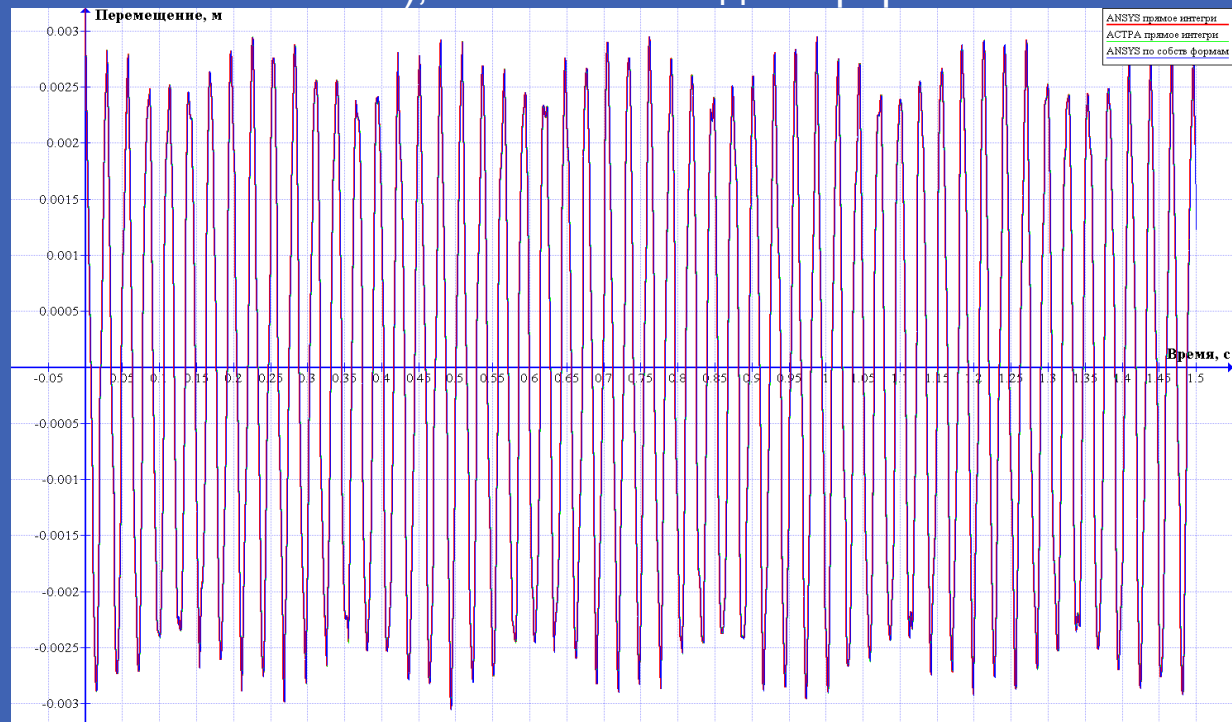
1,5





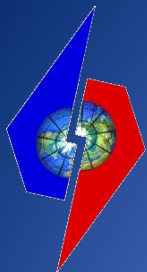
## Пример 2 – Стержень под действием внезапно снимаемой сосредоточенной силы

Перемещения консольного конца (от момента снятия статической нагрузки 1,5 с), м. Расчёт без демпфера



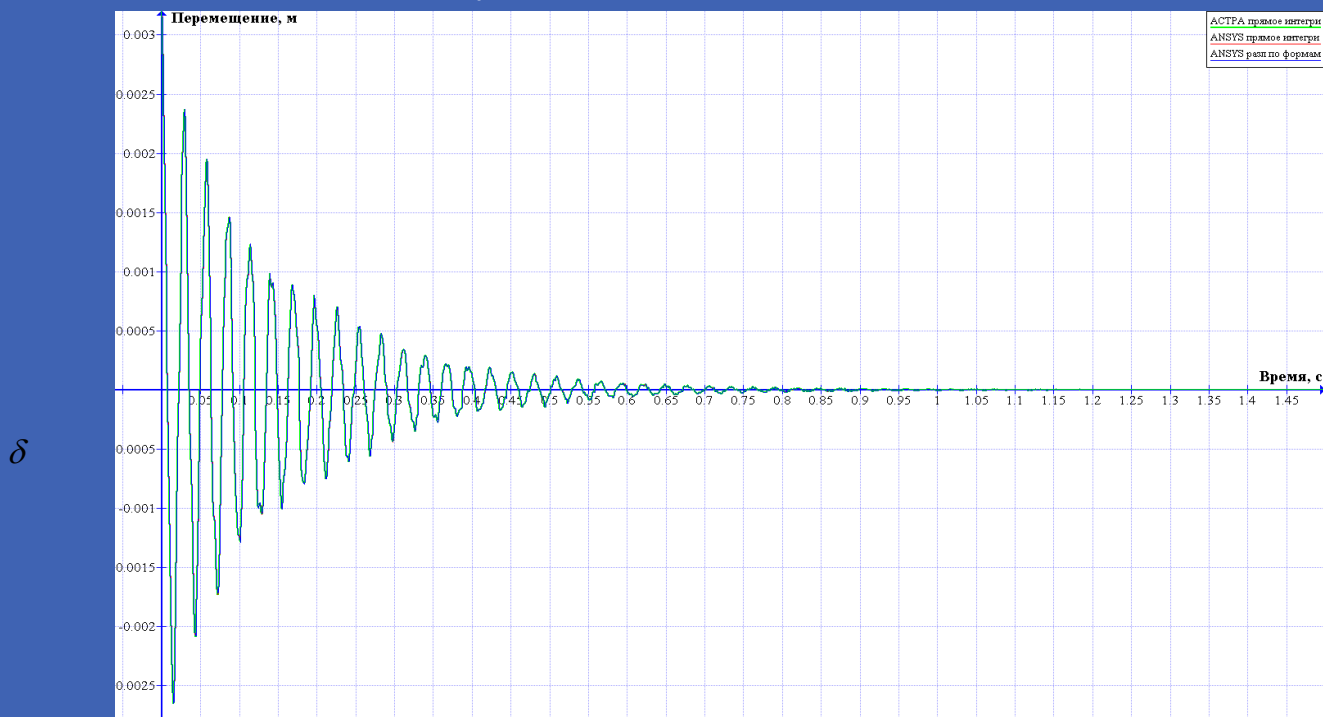
Результаты расчёта без демпфера

	Перемещения, $U_x$ , м	
	минимум	максимум
АСТРА-НОВА 202005 <sup>2</sup>	-3,04799E-03	2.947562E-03
ANSYS*	-3.05159E-03	2.95007E-03
$\delta$ , % (АСТРА vs ANSYS)	0,12	0,09



## Пример 2 – Стержень под действием внезапно снимаемой сосредоточенной силы

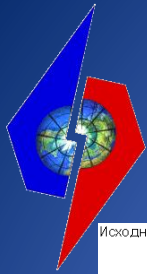
Перемещения консольного конца (от момента снятия статической нагрузки 1,5 с), м. Расчёт с демпфером



$\delta$

Результаты расчёта с демпфером

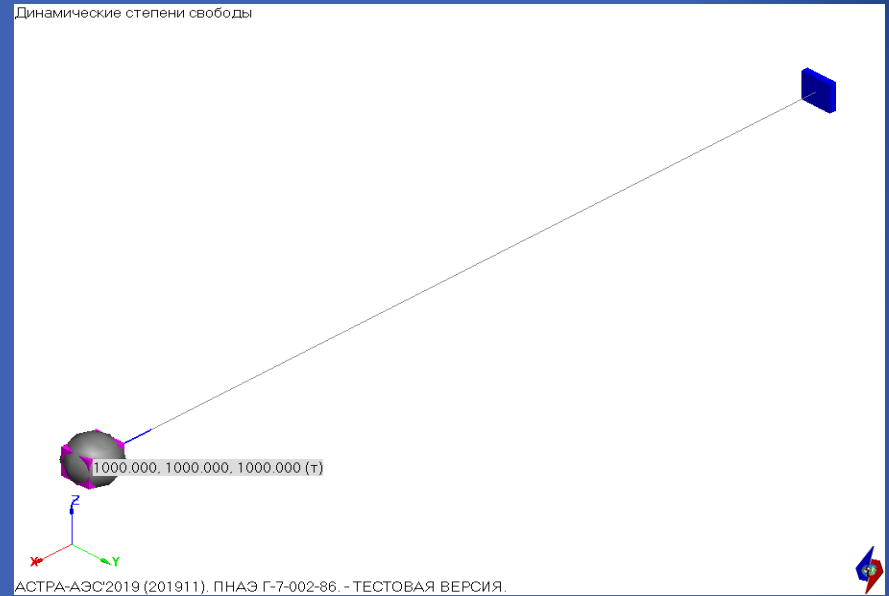
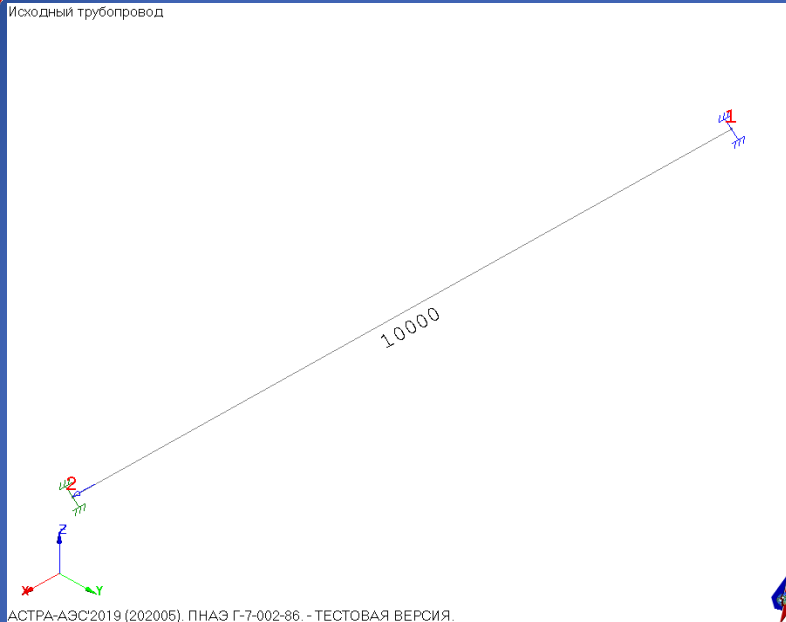
	Перемещения, $U_x$ , м	
	минимум	максимум
АСТРА-НОВА 202005 <sup>2</sup>	-2.633782E-03	2.374121E-03
ANSYS*	-2.634610E-03	2.374840E-03
$\delta$ , % (АСТРА vs ANSYS)	0,03	0,03



# Пример 3 – Стержень, нагруженный сосредоточенной периодической нагрузкой переменной частоты

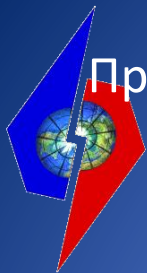
Расчётная модель (АСТРА-НОВА)

Динамическая модель (АСТРА-НОВА)



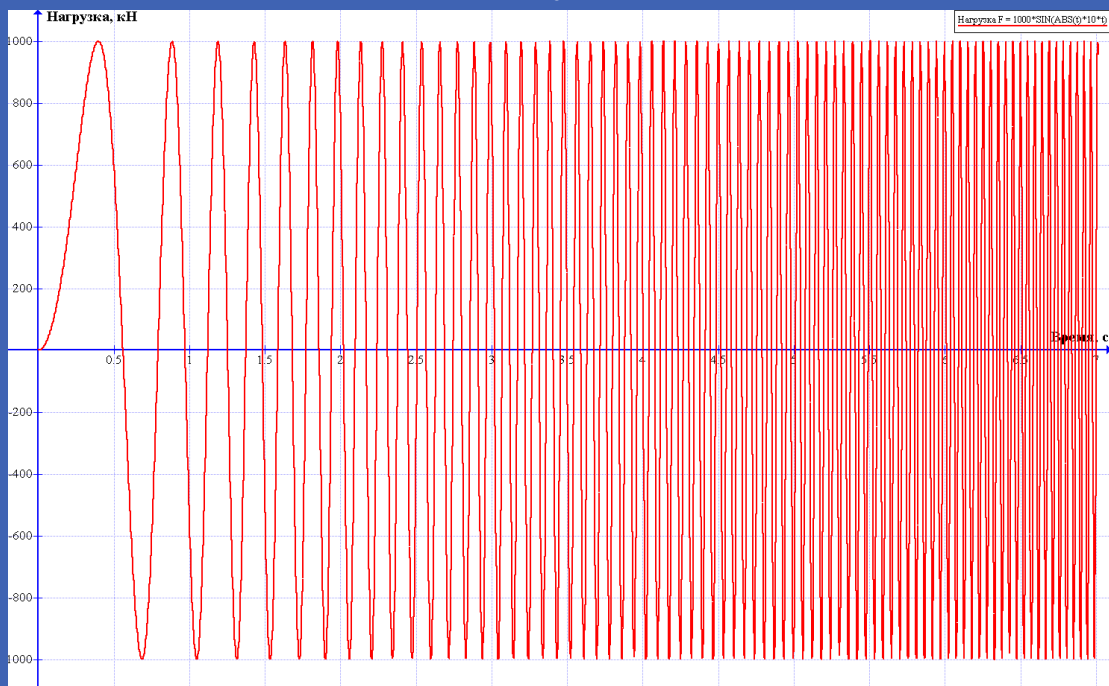
## Характеристики расчётной модели

Длина стержня, м	10
Поперечное сечение - кольцо	Труба 325x16
Модуль упругости, МПа	200000
Коэффициент Пуассона	0,3
<b>Граничные условия</b>	
Защемление (заделка) одного из концов	
Вязкоупругий демпфер на консольном конце, кН*с/м	1000
Сосредоточенная масса на консольном конце стержня, т	1000



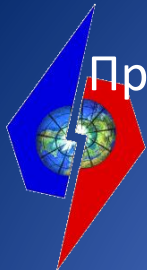
# Пример 3 – Стержень, нагруженный сосредоточенной периодической нагрузкой переменной частоты

Динамическая нагрузка во времени 0-7 с



## Параметры нагрузки

Направление – вдоль оси стержня	
Амплитуда возмущающей силы, кН	1000
Возмущающая частота, Гц	переменная, прямо пропорционально зависит от времени
Закон изменения приложенной нагрузки	$F(t) = 1000 \cdot \sin(10 \cdot t \cdot  t )$
Параметры расчёта	
Шаг интегрирования по времени, с	0.001
Время счёта, с	7



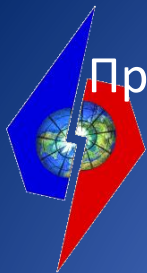
# Пример 3 – Стержень, нагруженный сосредоточенной периодической нагрузкой переменной частоты

Перемещения консольного конца, м. Расчёт без демпфера



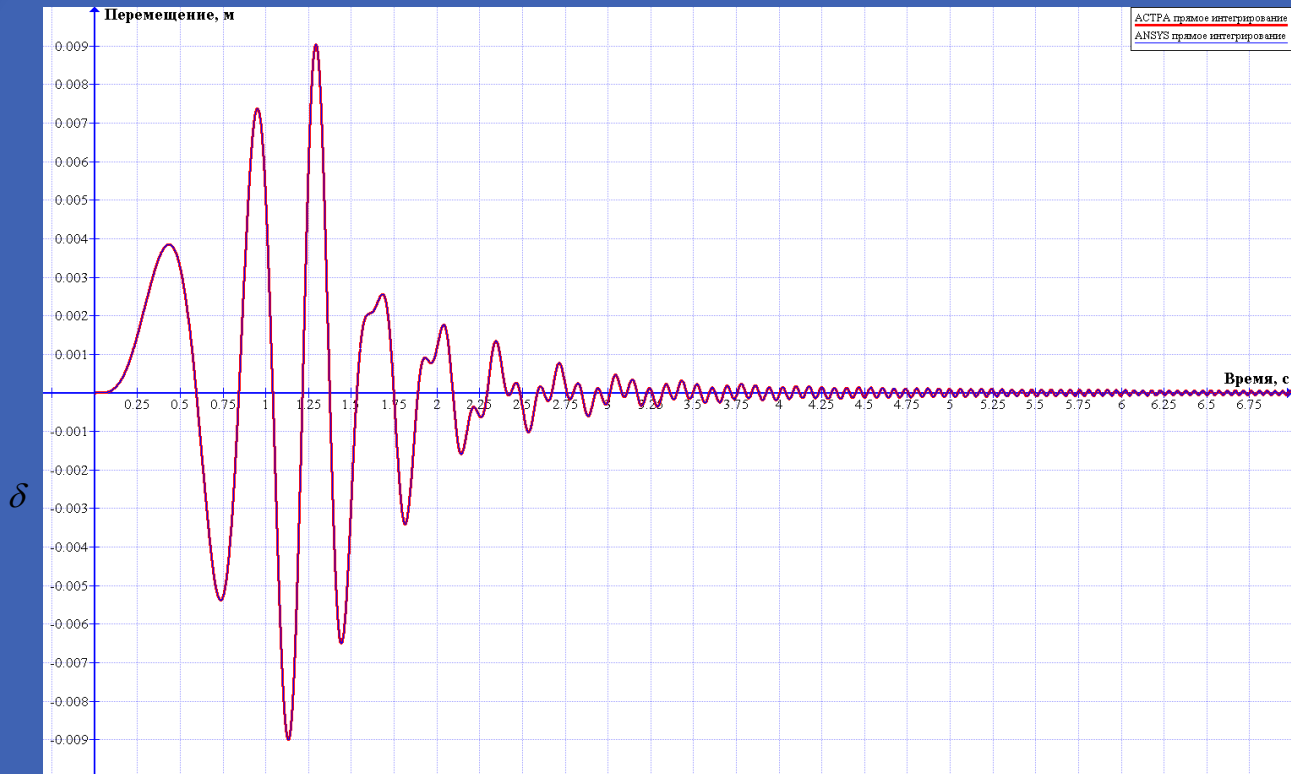
Результаты расчёта без демпфера

	Перемещения, $U_x$ , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-1.69761640E-02	<b>1.74106940E-02</b>
<i>ANSYS</i>	-1.69762035E-02	<b>1.74105516E-02</b>
<b><math>\delta</math>, % (АСТРА vs ANSYS)</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0008</b>



# Пример 3 – Стержень, нагруженный сосредоточенной периодической нагрузкой переменной частоты

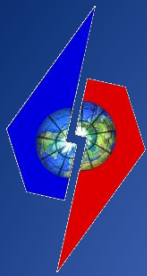
Перемещения консольного конца, м. Расчёт с демпфером



$\delta$

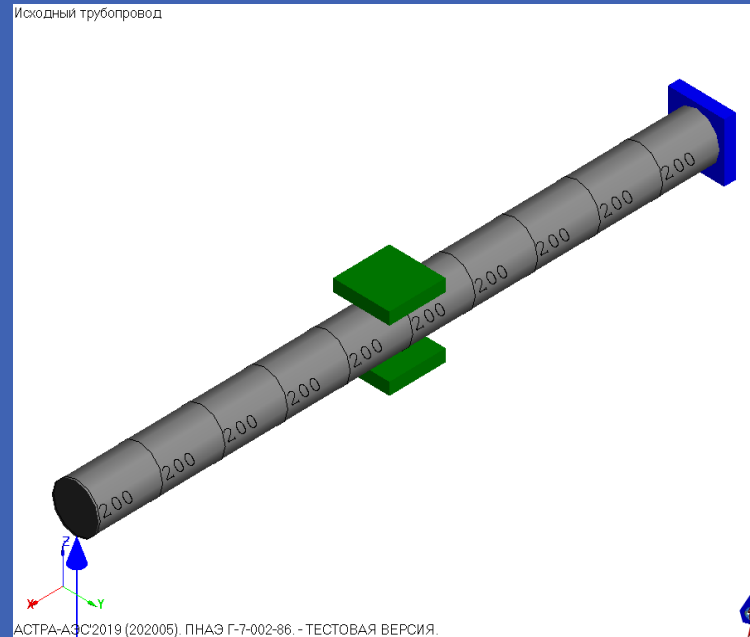
Результаты расчёта с демпфером

	Перемещения, $U_x$ , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-9.00504100E-03	9.03948000E-03
<i>ANSYS</i>	-9.00496435E-03	9.03948028E-03
$\delta$ , % ( <i>АСТРА vs ANSYS</i> )	-0.0009	-3.1e-006



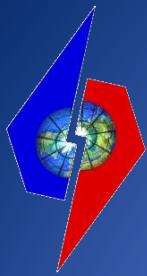
# Пример 4 - Вынужденные неустановившиеся колебания консольного стержня

Расчётная модель (**АСТРА-НОВА**)



## Характеристики расчётной модели

Длина стержня, м	2
Поперечное сечение - кольцо	Труба 150x7,3
Модуль упругости, МПа	204990
Коэффициент Пуассона	0,3
<b>Граничные условия</b>	
Защемление (заделка) одного из концов	
Вязкоупругий демпфер на консольном конце, кН*с/м	50
Погонная масса стержня, кг/м	245,36



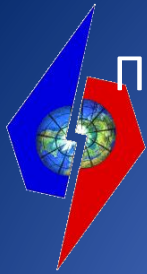
# Пример 4 - Вынужденные неустановившиеся колебания консольного стержня

Динамическая модель (АСТРА-НОВА)



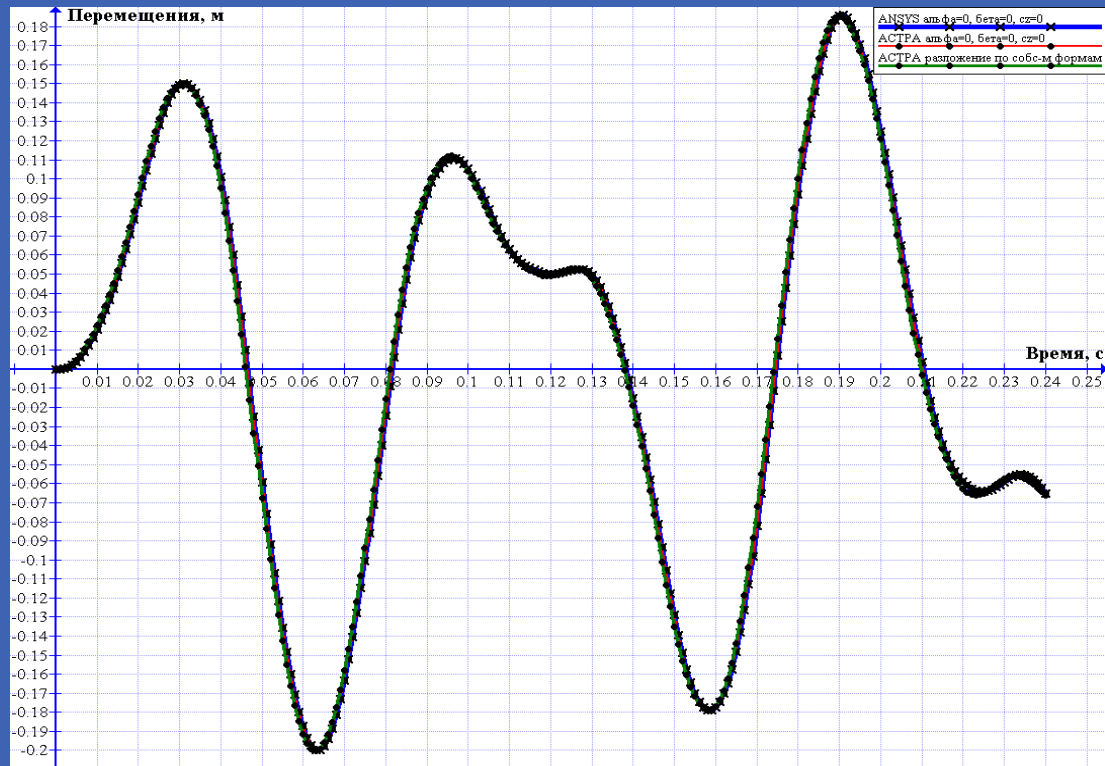
Параметры нагрузки	
Направление – поперёк оси стержня	
Амплитуда возмущающей силы, кН	100
Возмущающая частота, Гц	20
Параметры расчёта	
Шаг интегрирования по времени, с	0.001
Время счёта, с	0,24





# Пример 4 – Вынужденные неустановившиеся колебания консольно закрепленного стержня

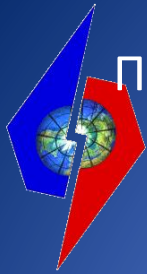
Перемещения консольного конца, м. Расчёт без демпфера



Результаты расчёта без демпфера

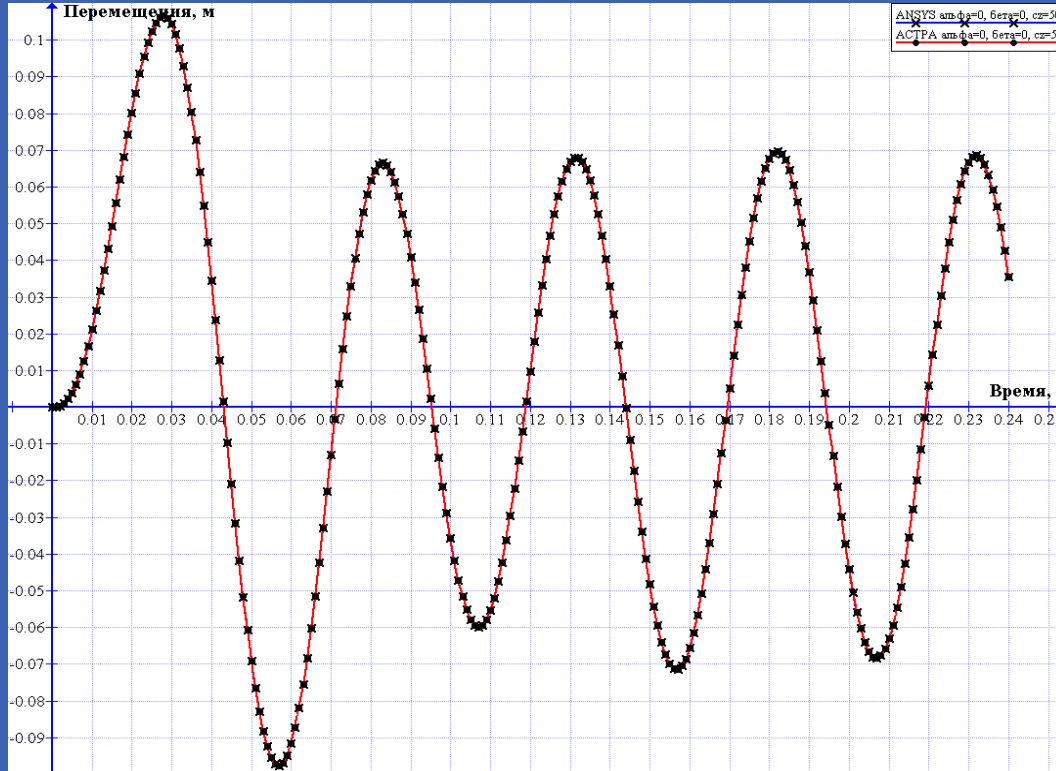
	Перемещения, $U_x$ , м	
	минимум	максимум
АСТРА-НОВА 202005	-1.9953000E-01	1.8552000E-01
ANSYS	-1.9969500E-01	1.8594700E-01
АСТРА-НОВА 202005 <sup>1</sup>	-2.0026878E-01	1.8565733E-01
$\delta$ , % (расчет vs теория)	0,08	0,23

<sup>1</sup> – расчёт методом разложения по формам (для справки)



# Пример 4 – Вынужденные неустановившиеся колебания консольно закрепленного стержня

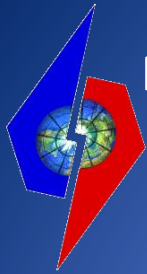
Перемещения консольного конца, м. Расчёт с демпфером



$\delta$

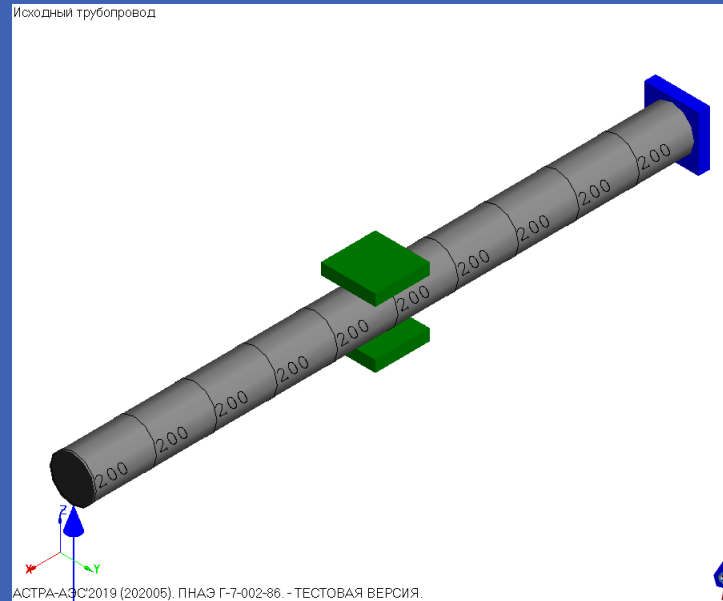
Результаты расчёта с демпфером

	Перемещения, $U_x$ , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-9.76193920E-02	1.06594826E-01
<i>ANSYS</i>	-9.76232000E-02	1.06596000E-01
$\delta$ , % ( <i>АСТРА vs ANSYS</i> )	0,004	0,001



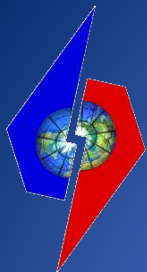
## Пример 5 – Вынужденные установившиеся колебания консольно закрепленного стержня

Расчётная модель (АСТРА-НОВА)



### Характеристики расчётной модели

Длина стержня, м	2
Поперечное сечение - кольцо	Труба 150x7,3
Модуль упругости, МПа	204990
Коэффициент Пуассона	0,3
<b>Граничные условия</b>	
Защемление (заделка) одного из концов	
Вязкоупругий демпфер на консольном конце, кН*с/м	50
Погонная масса стержня, кг/м	245,36



# Пример 5 - Вынужденные установившиеся колебания консольно закрепленного стержня

Динамическая модель (АСТРА-НОВА)



## Параметры нагрузки

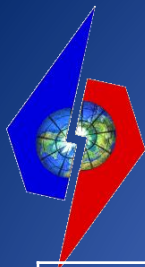
Направление - поперёк оси стержня

Амплитуда возмущающей силы, кН

Возмущающая частота, Гц

100

10; 15; 20



## Пример 5 - Вынужденные установившиеся колебания консольно закрепленного стержня

Расчёт без сосредоточенных демпферов

Вариант	$U_z, \text{ м}$		
	$\theta = 10 \text{ Гц}$	$\theta = 15 \text{ Гц}$	$\theta = 20 \text{ Гц}$
Теория[1]	0,574	0,228	0,073
АСТРА-АЭС'2009	0,640	0,211	0,070
АСТРА-АЭС 6.1[2]	0,641	0,211	0,070
АСТРА-НОВА 202005 <sup>1</sup>	0,64053	0,21170	0,07024
АСТРА-НОВА 202005 <sup>2</sup>	0,64044	0,21121	0,07017
ANSYS*	0.64081	0.21109	0.07008
$\delta, \%$ (расчет vs теория)	12,02	7,02	4,11

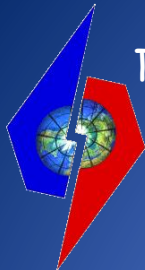
<sup>1</sup> - прямой метод;

<sup>2</sup> - разложение по собственным формам;

\* - для справки (прямой метод).

Расчёт с демпфером (в середине пролёта, демпфирование  $c = 50 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$ ) . Прямой метод

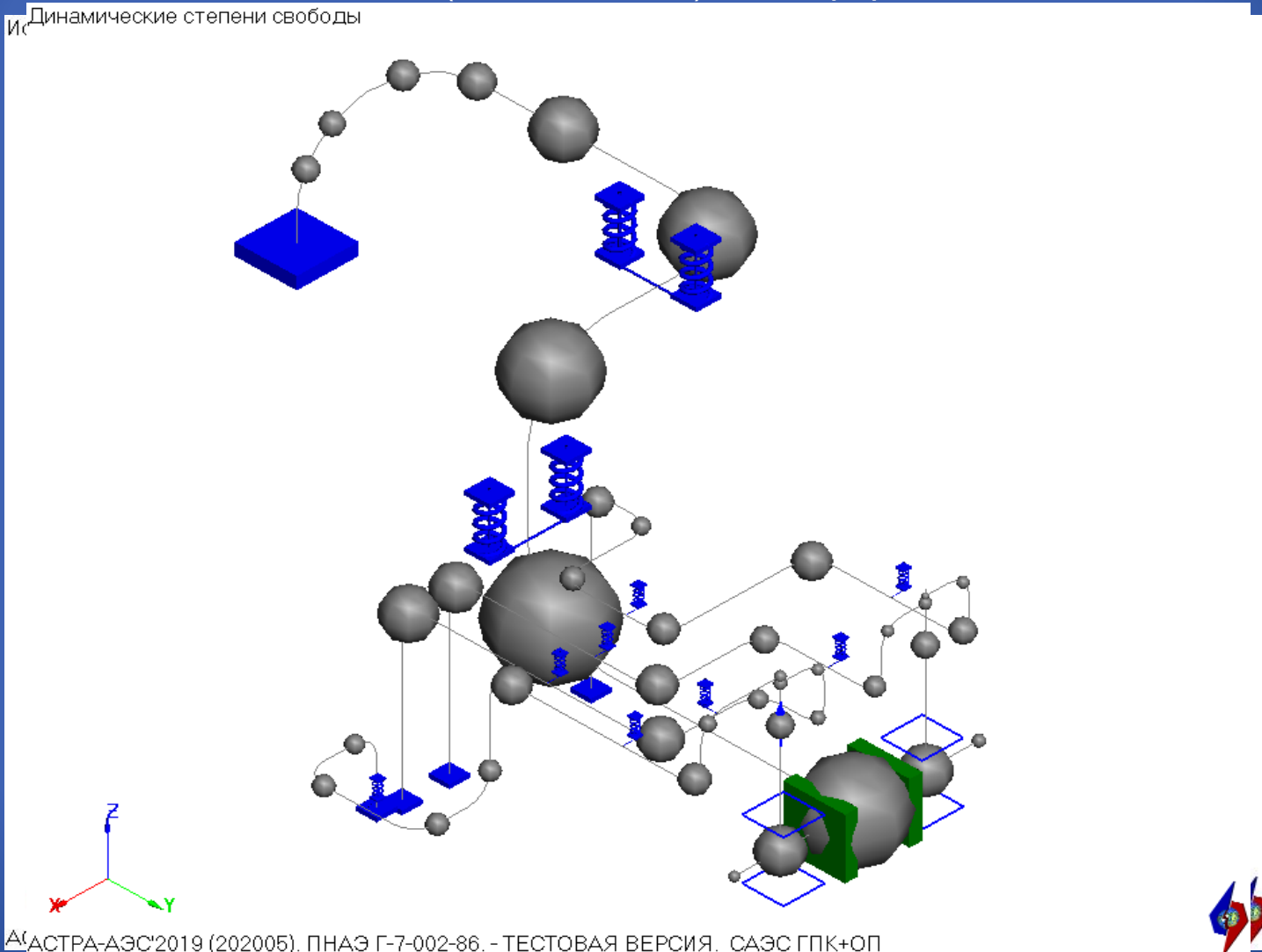
Вариант	$U_z, \text{ м}$		
	$\theta = 10 \text{ Гц}$	$\theta = 15 \text{ Гц}$	$\theta = 20 \text{ Гц}$
АСТРА-НОВА 202005	0,2471	0,14797	0,06928
ANSYS	0.2478	0.14783	0.06917
$\delta, \%$ (АСТРА vs ANSYS)	0,28	0,09	0,16



# Пример 6 - Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при действии сейсмических нагрузок

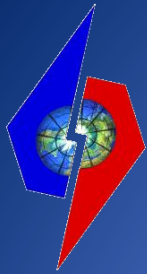
Работы выполнены в рамках гранта РФФИ № 18-01-00001-А.

Ис. Динамические степени свободы



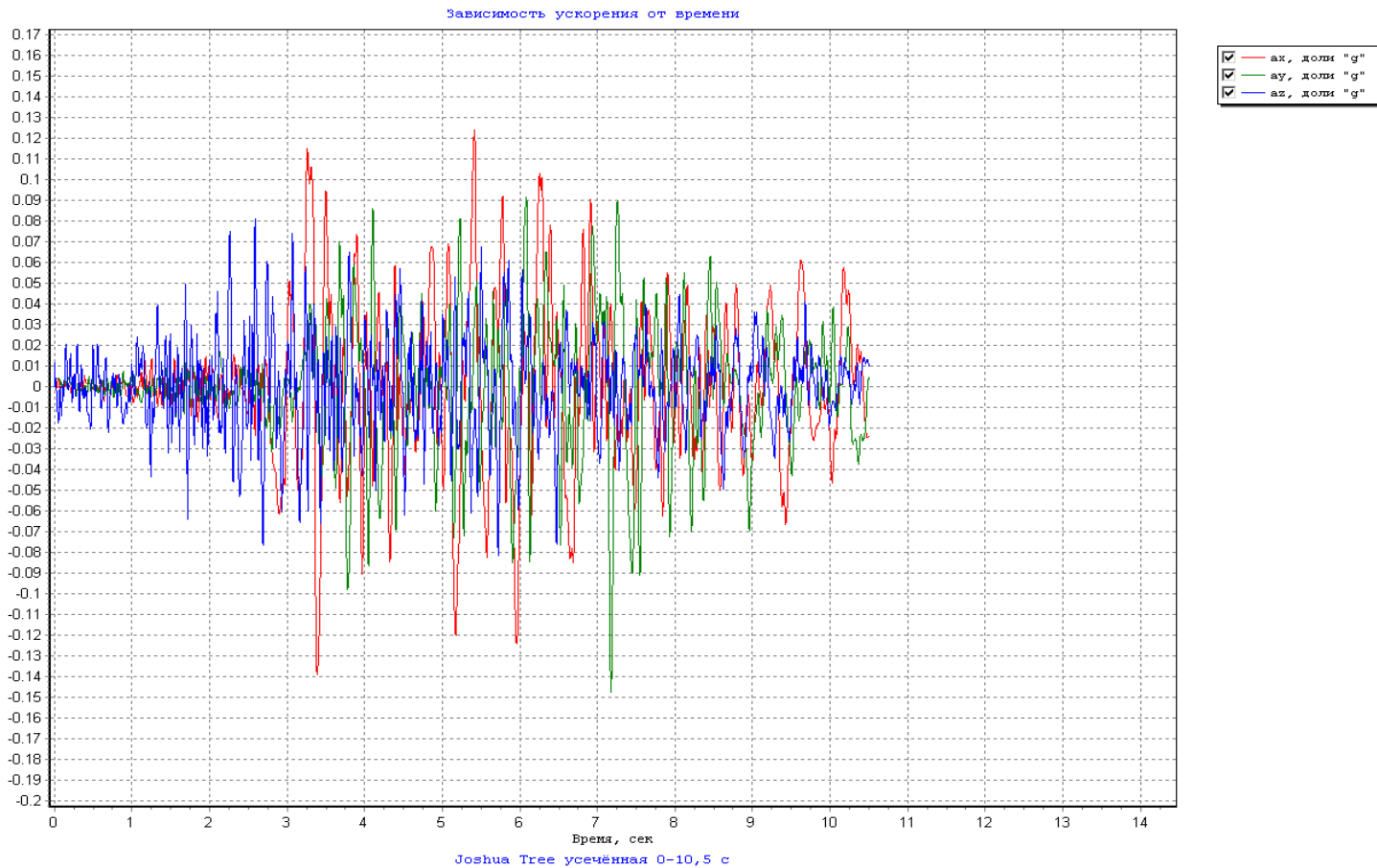
А.А. АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ. САЭС ГПК+ОП

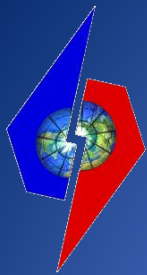




# Пример 6 – Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при действии сейсмических нагрузок

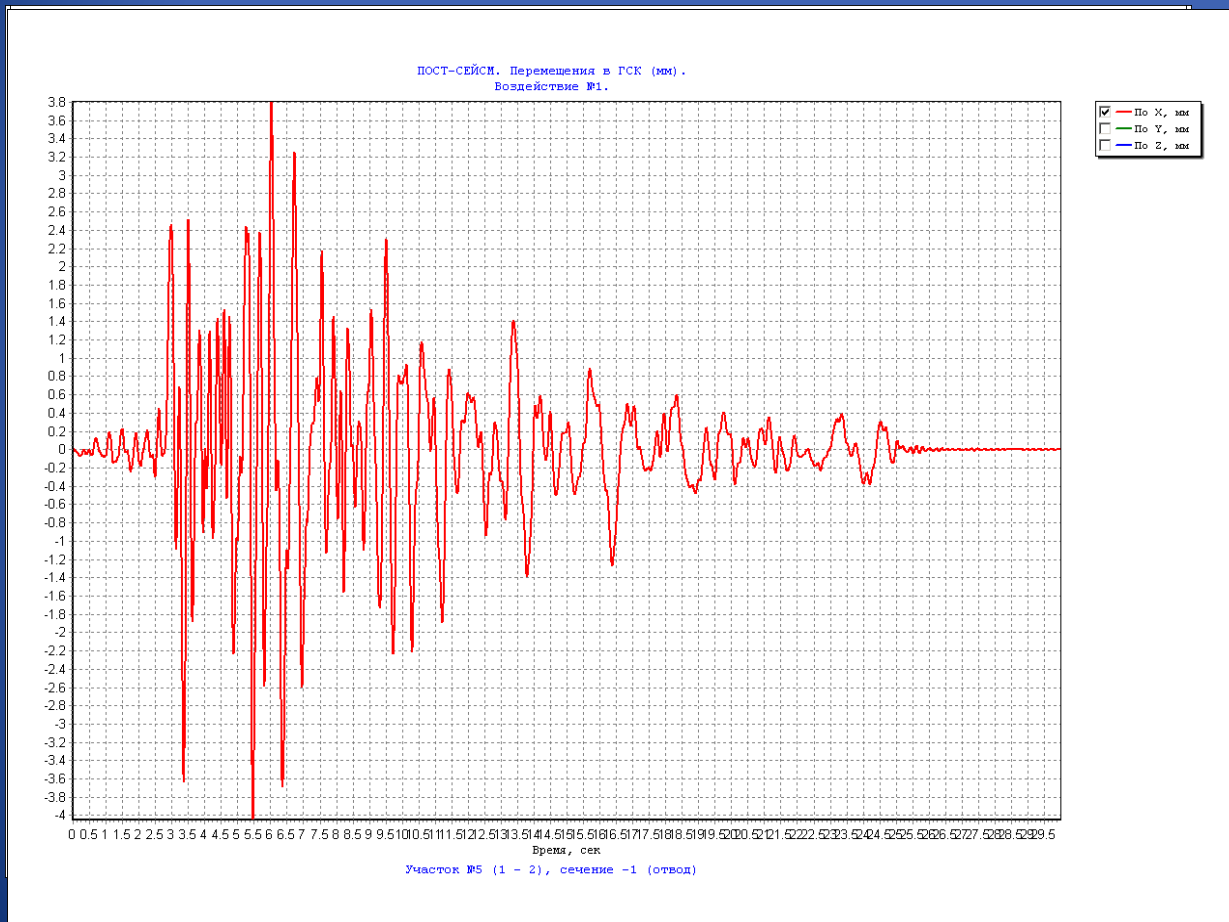
## Усреднённая акселерограмма (0-10,5 с)





# Пример 6 – Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при действии сейсмических нагрузок

Сейсмические перемещения в тройниковом узле с демпфером, мм  
Исходная акселерограмма землетрясения



**Демпфер отсутствует**

Мин. перемещения –19,5 мм  
Макс. перемещения +19,8 мм

**Вязкость демпфера – 25 кН\*с/м**

Мин. перемещения –8,1 мм  
Макс. перемещения +9,8 мм

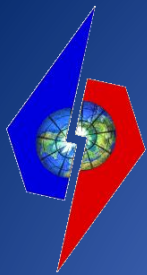
**Вязкость демпфера – 50 кН\*с/м**

Мин. перемещения –6,5 мм  
Макс. перемещения +6,2 мм

**Вязкость демпфера – 100 кН\*с/м**

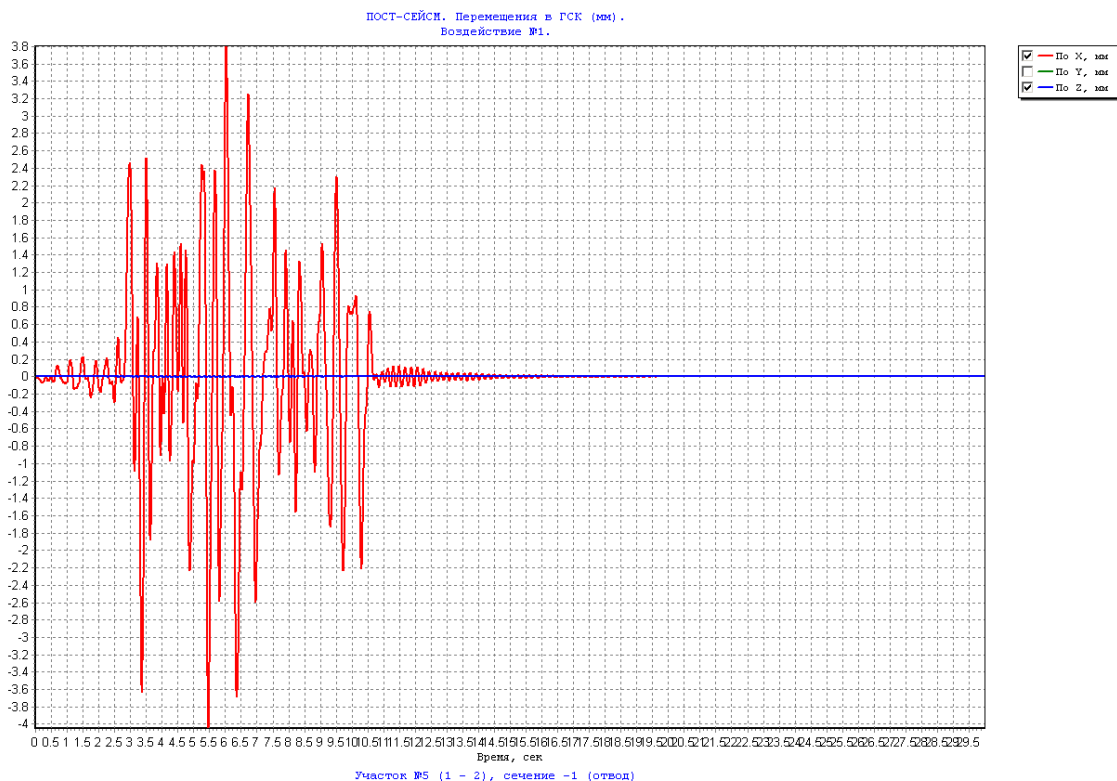
Мин. перемещения –4,0 мм  
Макс. перемещения +3,8 мм





# Пример 6 – Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при действии сейсмических нагрузок

Сейсмические перемещения в тройниковом узле с демпфером, мм  
Усечённая акселерограмма землетрясения



Демпфер отсутствует

Мин. перемещения –19,5 мм  
Макс. перемещения +19,8 мм

Вязкость демпфера – 25 кН\*с/м

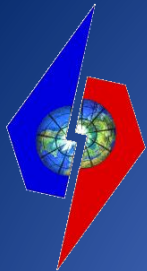
Мин. перемещения –8,1 мм  
Макс. перемещения +9,8 мм

Вязкость демпфера – 50 кН\*с/м

Мин. перемещения –6,5 мм  
Макс. перемещения +6,2 мм

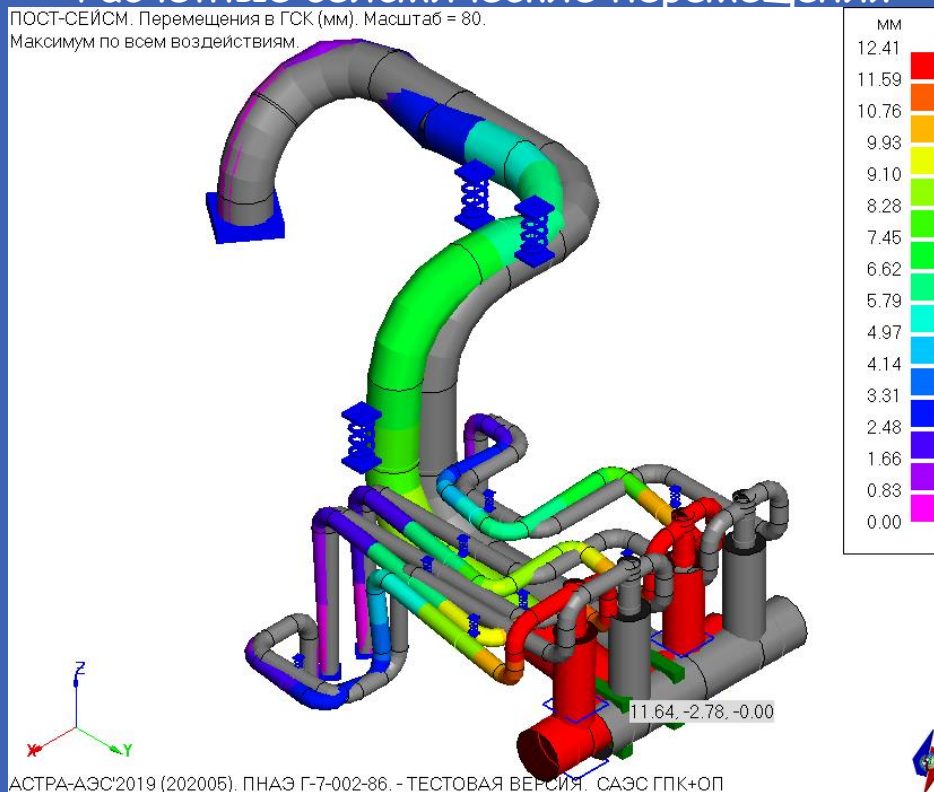
Вязкость демпфера – 100 кН\*с/м

Мин. перемещения –4,0 мм  
Макс. перемещения +3,8 мм

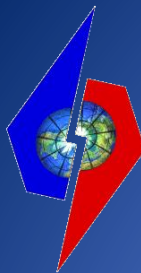


# Пример 6 - Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при сейсмических воздействиях

## Расчётные сейсмические перемещения

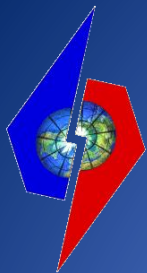


Вязкость демфера, кН*с/м	Перемещения по оси X, мм (вдоль оси магистрали тройника 820x820)	
	Минимум	Максимум
0	-19,5	+19,8
25	-8,1	+9,8
50	-6,5	+6,2
100	-4,0	+3,8



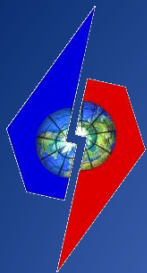
# Выводы

- Разработаны и реализованы эффективные методики динамического расчёта трубопроводных систем для режимов их установившихся и неустойчивых колебаний с учётом *вязкоупругих демпферов*;
- В разработанных численных методиках расчёта учтены особенности алгоритмов ПК **АСТРА-НОВА**:
  - использование, вместо матрицы жёсткости, матрицы податливости модели, построенной относительно динамических степеней свободы ТС;
  - реализованный суперэлементный подход при построении расчётных динамических моделей ТС.
- Проведена репрезентативная верификация реализованных методов расчёта (сопоставление с теоретическими решениями и/или результатами по верифицированным ПК);
- Количественно подтверждена, по результатам расчётов, эффективность демпферов - значимое снижение амплитуд и затухание колебаний трубопроводов при их использовании.



# Перспективные разработки и исследования

- Разработка и верификация алгоритмов учёта опор/связей с **нелинейным демпфированием** (нелинейные демпферы, опоры с трением, зазорами, антисейсмические амортизаторы, упругопластические упоры);
- Реализация альтернативных динамических методов расчёта с учётом демпферов: разложение по формам, прямое интегрирование уравнений движения;
- Динамические расчёты на сейсмические воздействия, заданные акселерограммами, по неплатформенной схеме возбуждения (многоопорное воздействие);
- Включение разработанных методик примеров в верификационный отчёт для прохождения переаттестации отраслевой ветви **АСТРА-АЭС** в системе Ростехнадзора (2021 год)



*Спасибо за внимание!*

*Thank you for your attention!*

*ЗАО НИЦ СтаДиО, Москва, [www.stadyo.ru](http://www.stadyo.ru)*