

Научно-исследовательский центр **СтаДиО**

“Семейство” программных комплексов
АСТРА-НОВА’2019™ (релиз 202005)

Верификационный отчет по новым возможностям.
Динамика с демпферными опорами

АЭС ПНАЭ Г-7-002-86 ИТ-Т.О.03.326-13	АСТРА-НОВА 2019			ММ 254.32 237.37 220.41 46 50 55 59 135.64 118.68 101.73 84.77 67.82 50.86 33.91 16.95 0.00
ТЭС РА 10-249-98	НИЦ СТАДИО			
НЕФТЕХИМ РТМ 38.001-24 ГОСТ 32388-2013	МАГИСТР СНИП 2.05.06-85 СП 36.13330.2012 ГОСТ Р 55989-2014 ГОСТ Р 55990-2014	СВА РА РТМ 26-01-44-78 ГОСТ Р 55600-2013	СУДПРОМ РА5Р.4322-86 РА5Р.5137-73	

WWW.STADYO.RU

Москва, 2020 г.

Оглавление

Расчёт неустановившихся колебаний ТС с демпферами (модули АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ДИН).....	3
Расчёт установившихся колебаний ТС с демпферами (модуль АСТРА-ВИБР).....	5
Пример 1. Пружинно-демпферная опора с сосредоточенной массой, нагруженная сосредоточенной периодической нагрузкой.....	7
Пример 2. Стержень под действием внезапно снимаемой сосредоточенной силы ..	10
Пример 3. Стержень, нагруженный сосредоточенной периодической нагрузкой переменной частоты.....	16
Пример 4. Вынужденные неустановившиеся колебания консольного стержня.	22
Пример 5. Вынужденные установившиеся колебания консольного стержня (АСТРА-ВИБР). Сопоставление с аналитическим решением и альтернативным программным комплексом.....	31
Пример 6. Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при действии сейсмических воздействий	37
Литература.....	46
Свидетельство РААСН о верификации ANSYS Mechanical	47

Расчёт неустановившихся колебаний ТС с демпферами (модули АСТРА-СЕЙСМ, АСТРА-ДИН)

Общее уравнение движения в матричной форме относительно динамических степеней свободы

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

где:

$[M]$ – матрица масс (инерции) системы, диагональная;

$[C]$ – матрица демпфирования системы;

$[K]$ – матрица жёсткости системы;

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

$\{\ddot{u}\} = \{u(\ddot{t})\}$ – искомый вектор ускорений;

$\{\dot{u}\} = \{u(\dot{t})\}$ – искомый вектор скоростей;

$\{u\} = \{u(t)\}$ – искомый вектор перемещений.

В случае учета акселерограммы землетрясения $a(t)$ для платформенной схемы возбуждения вектор $\{F(t)\}$ содержит эффективную инерционную сейсмическую нагрузку $-[M]\{a(t)\}$.

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

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

где:

α – коэффициент пропорциональности массы, c^{-1} ;

β – 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

Уравнение (1) и матрица демпфирования домножаются на матрицу податливости $[D]$, обратную матрице жёсткости $[K]$ (формируется в динамических модулях АСТРА-НОВА 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

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

$$[\tilde{C}] = \alpha[\tilde{M}] + \beta[\tilde{K}] + [\tilde{C}_{оп}],$$

а «эффективная» матрица жёсткости

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

Ниже изложен реализованный вариант неявной разностной схемы Ньюмарка

Начальные условия в момент времени t_0

$$\{^{t_0}u\}; \{^{t_0}\dot{u}\}; \{^{t_0}\ddot{u}\}$$

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

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

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

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

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

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

Коэффициенты $a_0 - a_7$ вычисляются по формулам:

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

Параметры α и δ принимаются $\delta \geq 0,5$, $\alpha \geq 0,25(0,5 + \delta)^2$. Значения параметров α и δ по умолчанию $\delta = 0,5$, $\alpha = 0,25$. Δt – шаг интегрирования по времени.

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

Искомые перемещения, усилия, напряжения во всех сечениях суперэлементной модели от действия полученных квазистатических нагрузок определяются по суперэлементному алгоритму, реализованному в АСТРА-НОВА [4].

Расчёт установившихся колебаний ТС с демпферами (модуль АСТРА-ВИБР)

Уравнение установившихся колебаний в матричной форме относительно динамических степеней свободы

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

где:

$[M]$ – матрица масс (инерции) системы, диагональная;

$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + [C_{оп}]$ – матрица демпфирования системы;

$[K]$ – матрица жёсткости системы;

$\{F(t)\}$ – вектор гармонических воздействий;

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

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

$\{u\}$ – искомый вектор перемещений;

Все точки механической системы имеют одинаковую частоту колебаний, однако, колеблются не обязательно синфазно. Демпфирование вызывает фазовые сдвиги.

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} – максимальная амплитуда нагрузки;

ϕ – сдвиг фаз (рад);

θ – 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} – максимальная амплитуда перемещений, м;

Заметим, что u_{max} и ϕ могут быть различны для каждой степени свободы. Используя обозначения в комплексных числах, решение описывается в виде

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

или

$$\{u\} = (\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\theta t}$$

где

$\{u_1\} = \{u_{max} \cos \phi\}$ – действительная часть вектора перемещений

$\{u_2\} = \{u_{max} \sin \phi\}$ – мнимая часть вектора перемещений

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;

$$\{\tilde{u}\} = \{u_1\} + i\{u_2\}$$

$$\{\tilde{F}\} = \{\tilde{F}_1\} + i\{\tilde{F}_2\}$$

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 по суперэлементному алгоритму, реализованному в АСТРА-НОВА [4].

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

Тип задачи	Динамический расчёт (неустановившиеся воздействия)
Тип(ы) верифицируемых элементов	Пружинно-демпферная опора, сосредоточенная масса
Входной файл	Модель C:\Users\STD\Desktop\Dyn\primer1.anp D:\awork\macro\ primer1.mac

1.1. Постановка задачи

Рассматривается пружинно-демпферная опора с сосредоточенной массой.

Требуется провести сопоставление неустановившихся колебаний массы, закреплённой с помощью пружинно-демпферной опоры под действием периодической по времени силы, переменной частоты, рассчитанных по комплексам программ АСТРА-НОВА 202005 (программа АСТРА-ДИН) и ANSYS [3].

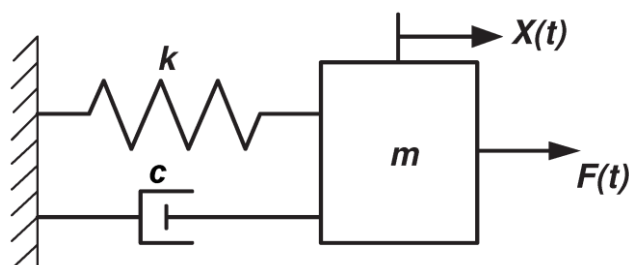


Рис. 1.1. Расчетная схема задачи: пружинно-демпферная опора с сосредоточенной массой

1.2. Исходные данные

Характеристики пружинно-демпферной опоры:

- жёсткость $k = 100$ кН/м
- демпфирование $c = 1$ кН*с/м
- масса $m = 0,1$ т

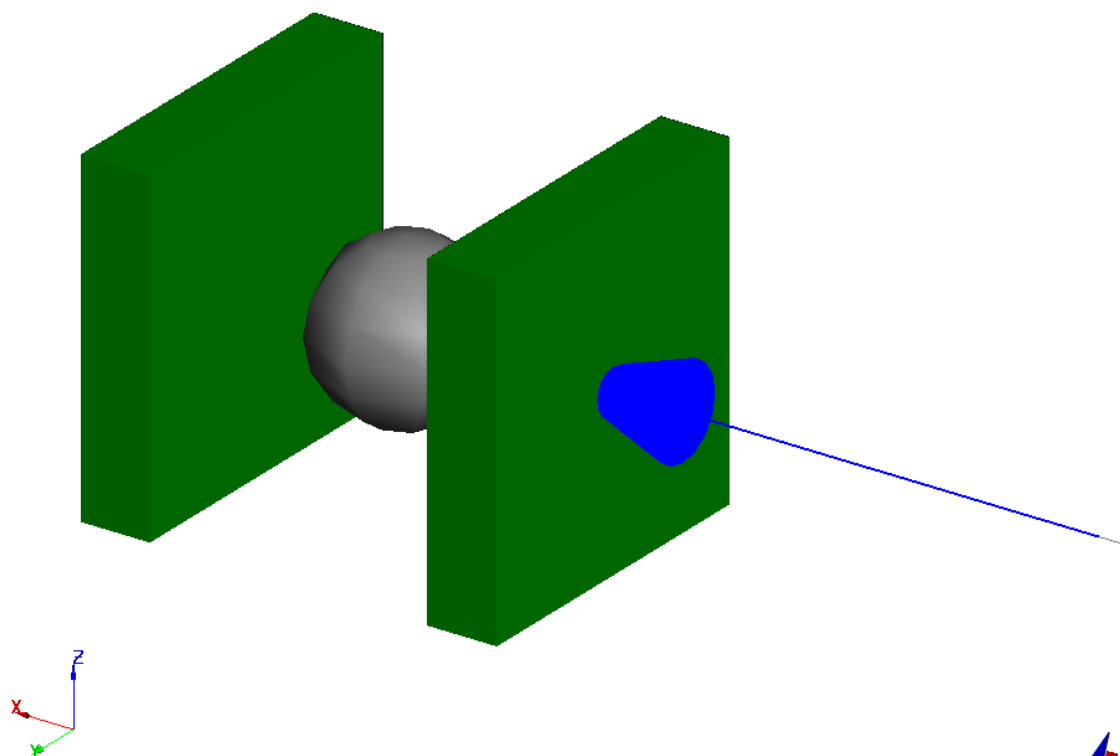
Параметры нагрузки

- амплитуда возмущающей силы $F_x = 100$ кН;
- возмущающая частота – переменная, прямо пропорционально зависит от времени;
- закон изменения приложенной нагрузки $F(t) = 100 \cdot \sin(10 \cdot t \cdot |t|)$

Параметры расчёта

- $\Delta t = 0.001$ с - шаг интегрирования по времени
- Время счёта $t = 7$ с

1.3. Расчетная модель



АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.



Рис. 2.2. Расчетная АСТРА-модель пружинно-демпферной опоры с сосредоточенной массой и сосредоточенной динамической нагрузкой.

Пружинно-демпферная опора с сосредоточенной массой имеет единственную степень свободы.

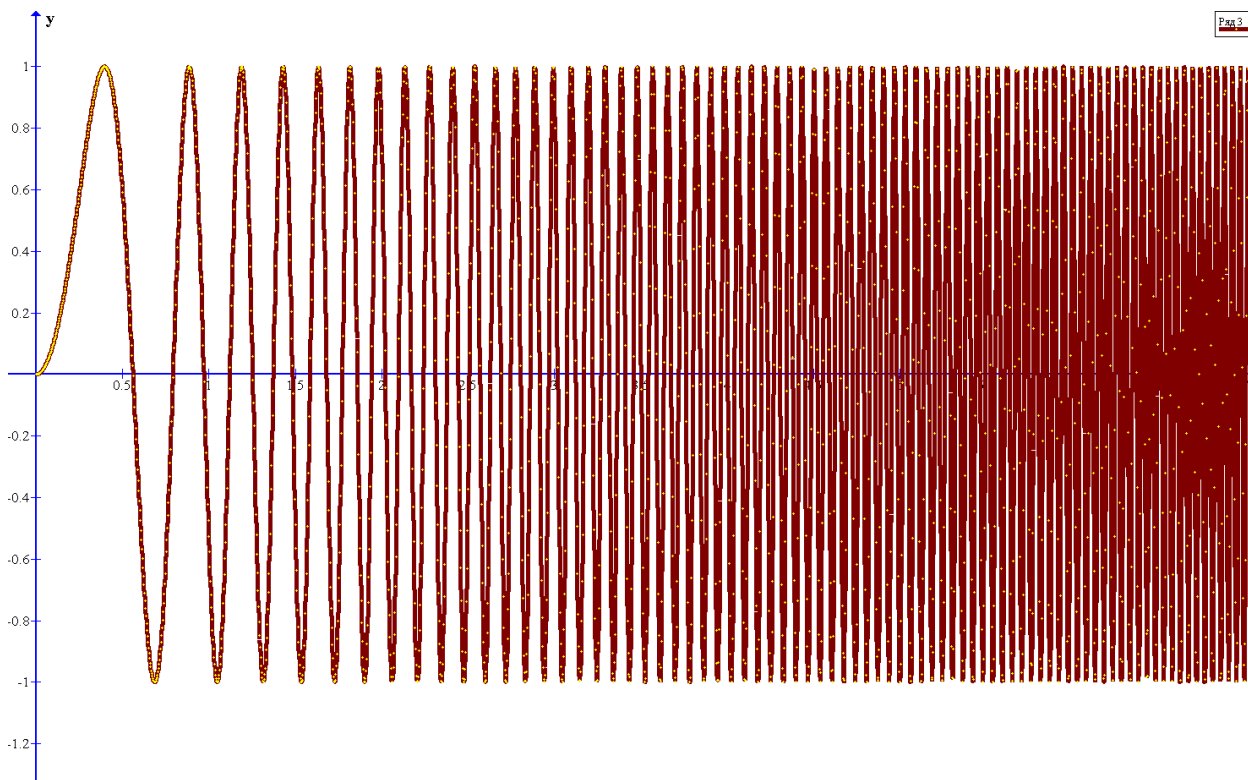


Рис. 1.1. Динамическая нагрузка на пружинно-демпферную опору во времени 0-7 с

1.4. Методика расчета

Для каждого шага по времени были определены перемещения сосредоточенной массы, закреплённой пружинно-демпферной опорой. Расчёт проведён по *АСТРА-НОВА 202005* и по *ANSYS* методом прямого интегрирования уравнений движения. Интегрирование уравнений движения выполнялось методом Ньюмарка с параметрами устойчивости $\alpha = 0,25$, $\delta = 0,5$.

1.5. Результаты

На рис. 1.2 представлен график зависимости перемещения от времени, полученные в программных комплексах *АСТРА-НОВА 202005* и *ANSYS*. Отметим идентичность полученных результатов, что позволяет судить об адекватности и достаточной разрешающей способности алгоритма расчета методом прямого интегрирования неустановившихся динамических процессов, заложенного в ПК *АСТРА-НОВА 202005*.

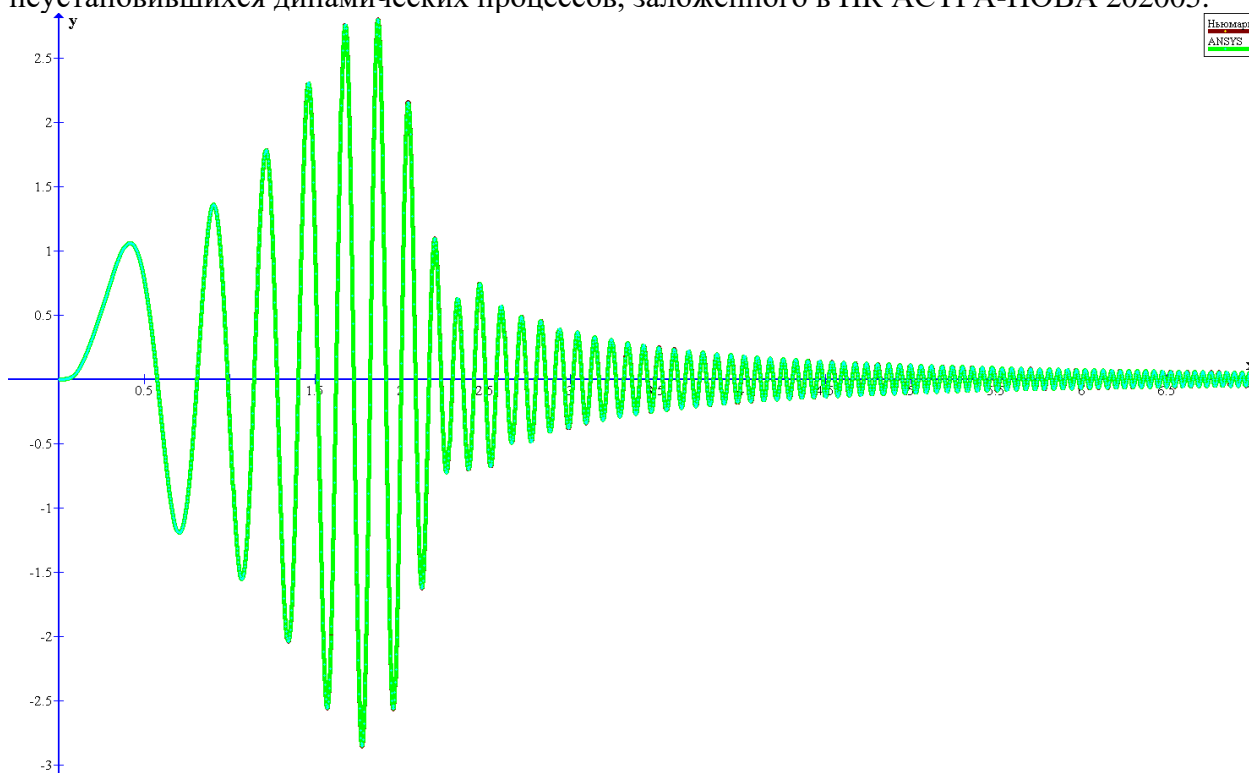


Рис. 1.2. Перемещения сосредоточенной массы на пружинно-демпферной опоре во времени 0-7 с, м

Таблица 1.1

Результаты расчёта

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i> ²	-2,857539	2,804783
<i>ANSYS</i> *	-2,857539	2,804783
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0	0

Пример 2. Стержень под действием внезапно снимаемой сосредоточенной силы

Тип задачи	Динамический расчёт (неустановившиеся воздействия)
Тип(ы) верифицируемых элементов	Прямая труба, мертвая опора (заделка), пружинно-демпферная опора, сосредоточенная масса
Входной файл	C:\Users\STD\Desktop\Dyn\primer2.anp D:\awork\macro\primer2.mac

2.1. Постановка задачи

Рассматривается прямолинейный стержень, представленный на рис. 2.1.

Требуется провести сопоставление неустановившихся осевых колебаний консольного конца под действием внезапно снятой с него предварительно приложенной сосредоточенной растягивающей силы, рассчитанных по комплексам программ АСТРА-НОВА 2020 (программа АСТРА-ДИН) и ANSYS [3].

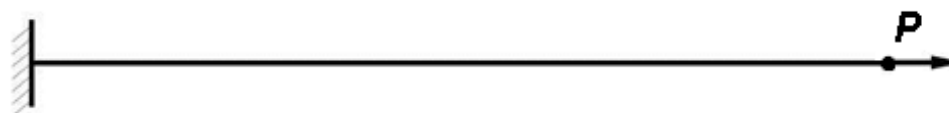


Рис. 2.1. Расчетная схема задачи: консольный стержень

2.2. Исходные данные

Геометрические характеристики

- длина стержня $l = 10$ м;
- поперечное сечение - кольцо с наружным диаметром 325 мм и толщиной стенки 16 мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 200000$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;

Граничные условия (опоры)

- защемление (заделка) одного из концов.
- вязкоупругий демпфер на консольном конце:
 $c_x = 100$ Н*с/м – демпфирование

Параметры нагрузки

- направление – вдоль оси стержня
- $P_x = 1000$ кН – предварительно приложенная и внезапно снимаемая осевая статическая нагрузка на консольный конец стержня
- $m = 1529.05$ кг/м – погонная масса стержня;

Параметры распределённого демпфирования

- распределённое демпфирование отсутствует

Параметры расчёта

- $\Delta t = 0.001$ с - шаг интегрирования по времени
- Время счёта $t = 1,5$ с (после снятия нагрузки)

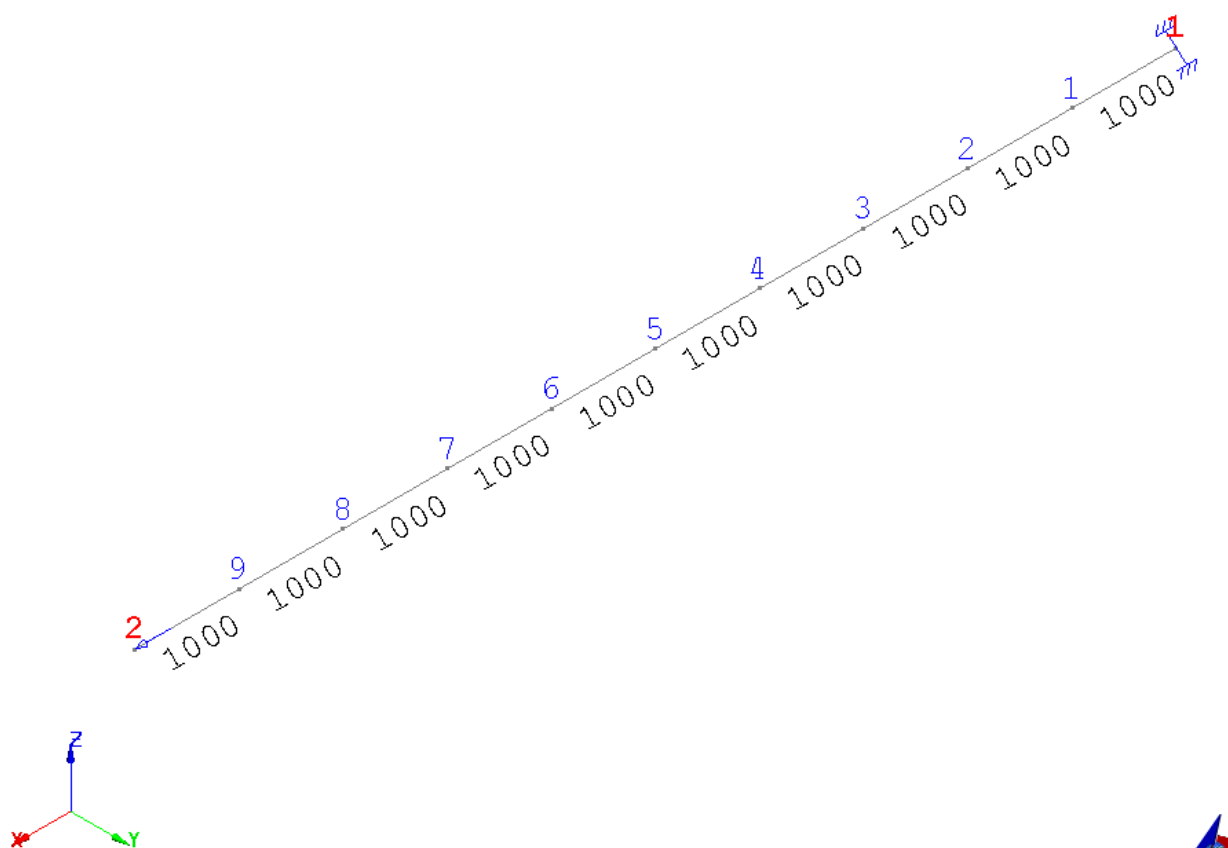
Рассмотрены два варианта расчёта: с демпфером на свободном конце и без такового.

Результаты, полученные по ANSYS и АСТРА-НОВА методом прямого интегрирования близки, методом разложения по собственным формам – имеются незначительные отличия.

2.3. Расчетная модель

Консольная балка аппроксимируется одним участком с десятью прямолинейными отрезками, (рис. 2.2, 2.3). Динамическая модель включает 33 динамические степени свободы и представлена на рис. 2.4.

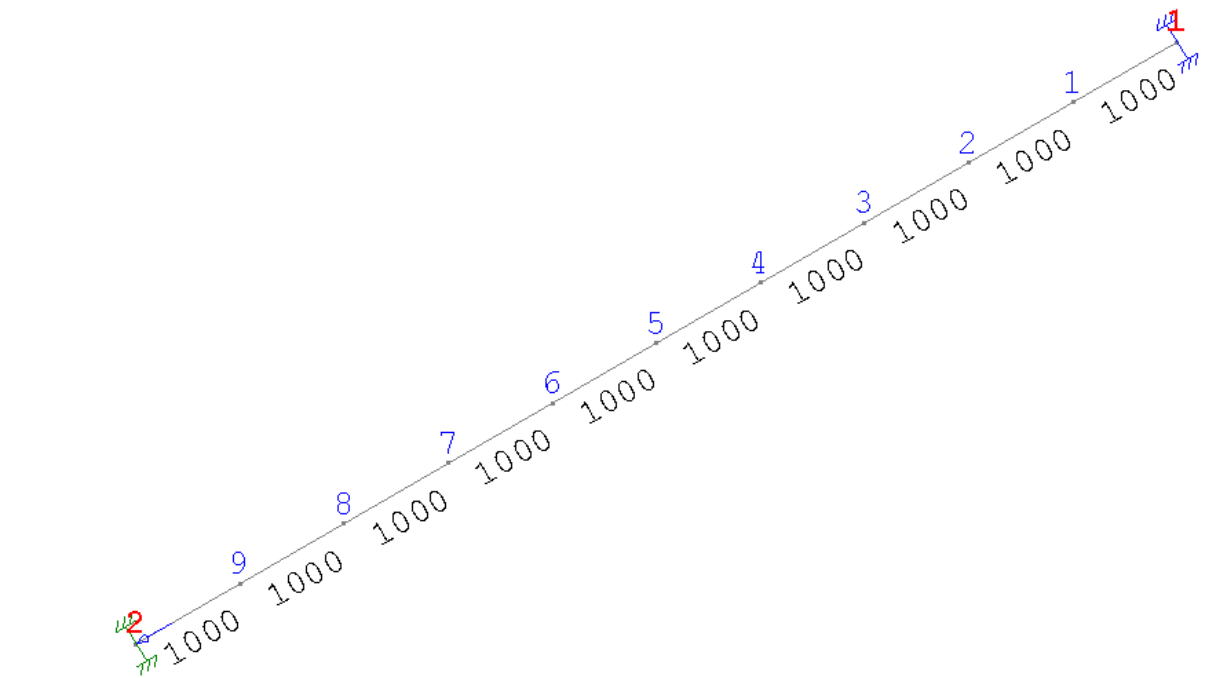
Исходный трубопровод



АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 2.2. Расчетная АСТРА-модель. Вариант без демпфера

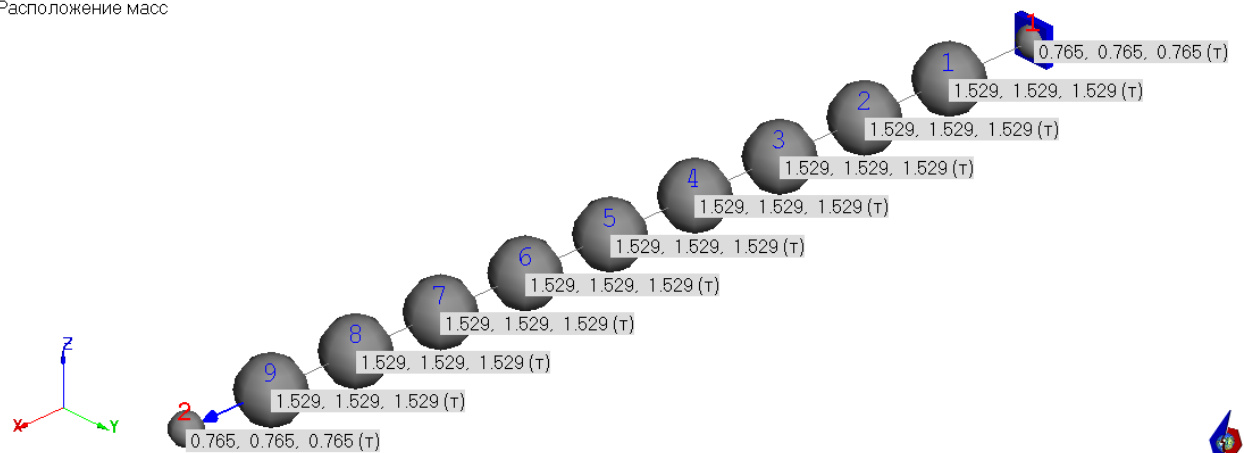
Исходный трубопровод



АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 2.3. Расчетная АСТРА-модель. Вариант с сосредоточенным демпфером на консоли

Расположение масс



АСТРА-АЭС'2019 (201911). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 2.4. Динамическая модель

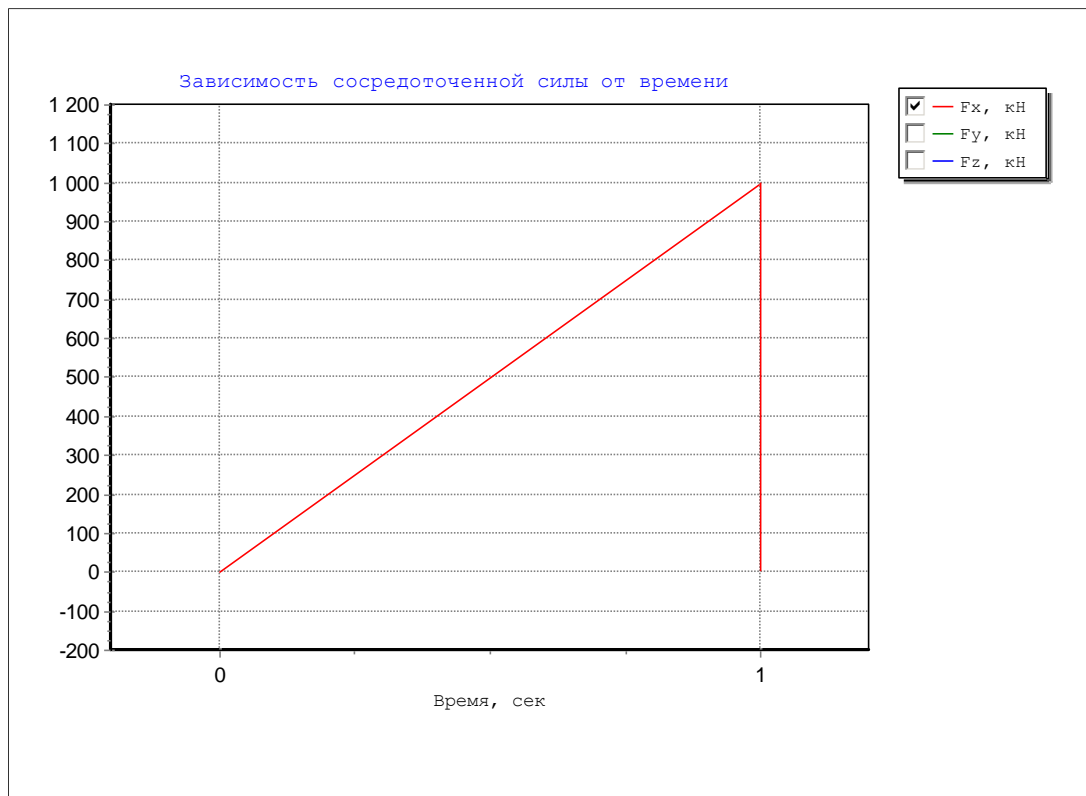


Рис. 2.5. Статическая нагрузка, кН. В диапазоне 0-1 с приложение нагрузки, в момент 1 с внезапное снятие

2.4. Методика расчета

Для каждого шага по времени были определены перемещения консольного конца стержня. Расчёт проведён по *АСТРА-НОВА 202005* и по *ANSYS* двумя методами расчёта: прямое интегрирование уравнений движения и разложение по собственным формам колебаний. Интегрирование уравнений движения выполнялось методом Ньюмарка с параметрами устойчивости $\alpha = 0,25$, $\delta = 0,5$. При расчёте с помощью разложения по формам учитывалось 13 собственных форм в диапазоне 0,87 Гц – 62,61 Гц, из которых продольным колебаниям соответствуют формы № 9 - 35,6 Гц и № 16 – 106,5 Гц.

Расчёт проводился в двух вариантах: без сосредоточенного демпфера и с сосредоточенным демпфером.

2.5. Результаты

На рис. 2.6 – 2.8 представлены графики зависимостей перемещения консольного конца стержня от времени, полученные в программных комплексах *АСТРА-НОВА 202005* и *ANSYS*. Отметим достаточную близость полученных результатов (результаты во всём диапазоне практически идентичны), что позволяет судить об адекватности и достаточной разрешающей способности алгоритма расчета методом прямого интегрирования неустановившихся динамических процессов, заложенного в ПК *АСТРА-НОВА 202005*.

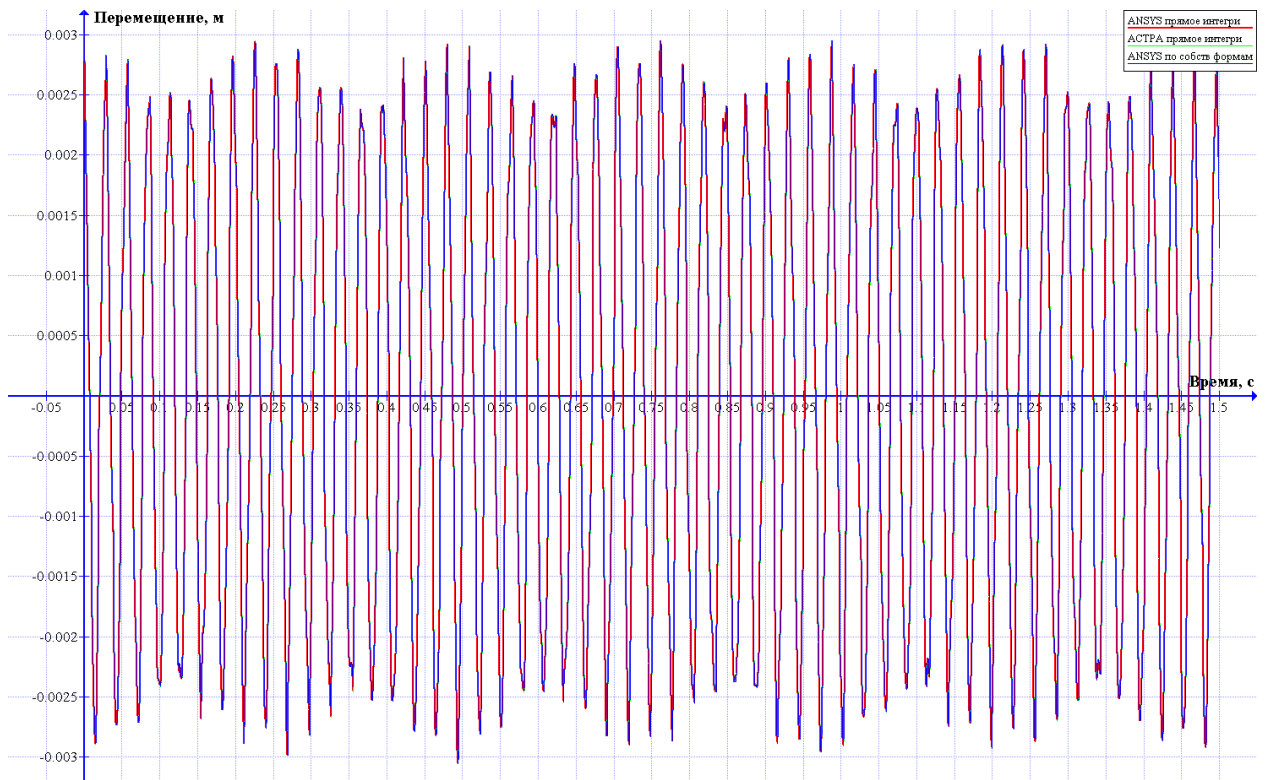


Рис. 2.7. Перемещения консольного конца (от момента снятия статической нагрузки 1,5 с), м. Расчёт без демпфера.

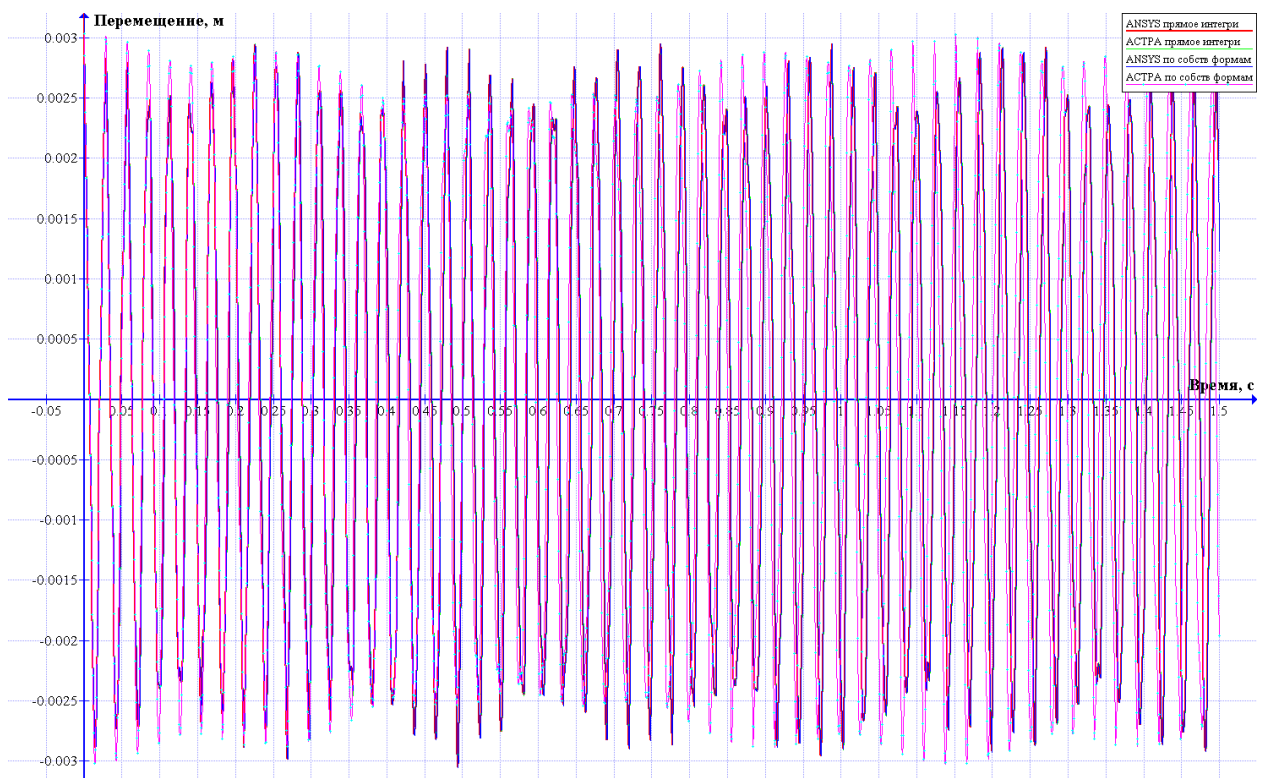


Рис. 2.7. Перемещения консольного конца (от момента снятия статической нагрузки 1,5 с), м. Расчёт без демпфера. Отмечается отличие результатов, полученных по АСТРА-НОВА разложением по формам, от результатов, полученных методом прямого интегрирования

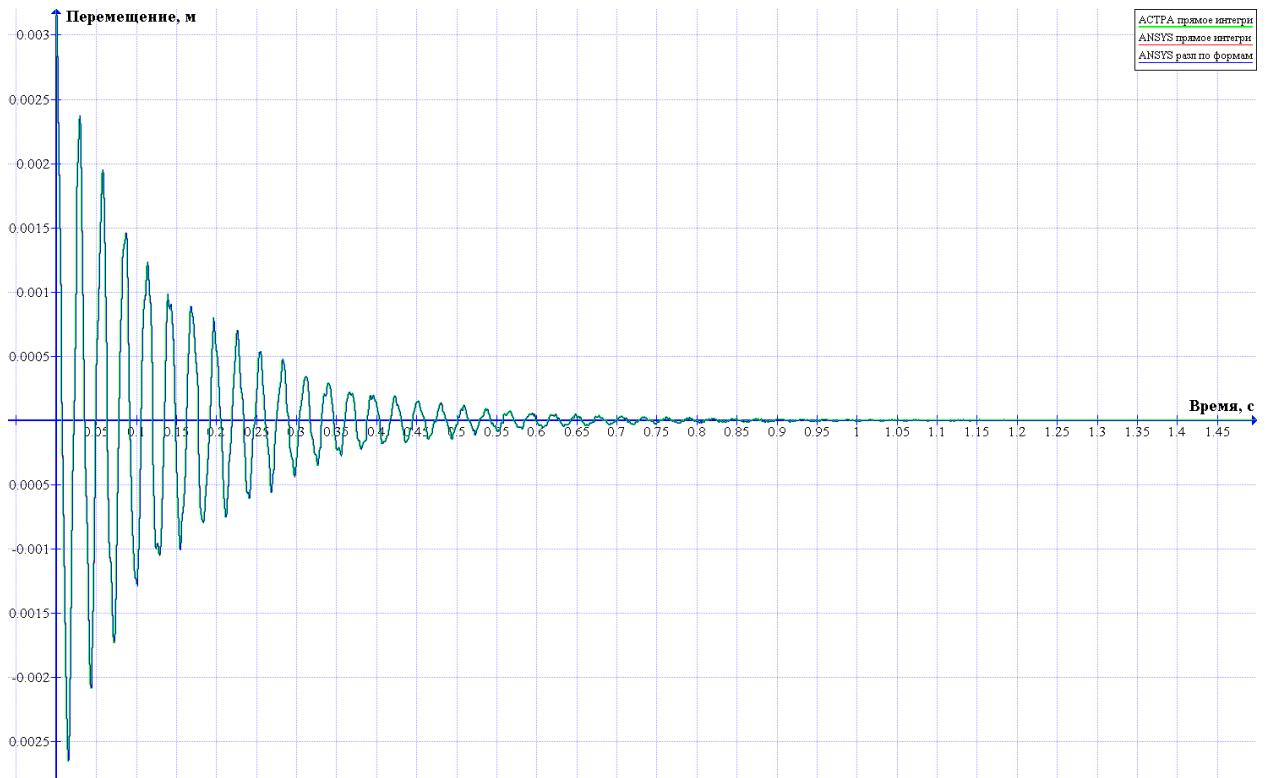


Рис. 2.8. Перемещения консольного конца (от момента снятия статической нагрузки нагрузки 1,5 с), м. Расчёт с демпфером.

Таблица 2.1

Результаты расчёта методом прямого интегрирования без демпфера

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005²</i>	-3,04799E-03	2.947562E-03
<i>ANSYS*</i>	-3.05159E-03	2.95007E-03
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,12	0,09

Таблица 2.2

Результаты расчёта методом прямого интегрирования с демпфером

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005²</i>	-2.633782E-03	2.374121E-03
<i>ANSYS*</i>	-2.634610E-03	2.374840E-03
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,03	0,03

Пример 3. Стержень, нагруженный сосредоточенной периодической нагрузкой переменной частоты

Тип задачи	Динамический расчёт (неустановившиеся воздействия)
Тип(ы) верифицируемых элементов	Прямая труба, мертвая опора (заделка), пружинно-демпферная опора, сосредоточенная масса
Входной файл	C:\Users\STD\Desktop\Dyn\primer3.anp D:\awork\macro\primer3.mac

3.1. Постановка задачи

Рассматривается прямолинейный стержень представленный на рис. 3.1.

Требуется провести сопоставление неустановившихся изгибных колебаний консольного конца под действием периодической по времени силы, переменной частоты, рассчитанных по комплексам программ АСТРА-НОВА 202005 (программа АСТРА-ДИН) и ANSYS [3].

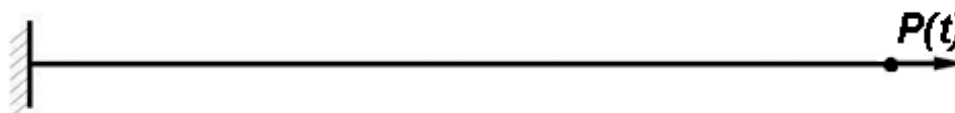


Рис. 3.1. Расчетная схема задачи: консольный стержень

3.2. Исходные данные

Геометрические характеристики

- длина стержня $l = 10$ м;
- поперечное сечение - кольцо с наружным диаметром 325 мм и толщиной стенки 16 мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 200000$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;

Граничные условия (опоры)

- защемление (заделка) одного из концов.
- вязкоупругий демпфер на консольном конце:
 $c_x = 1000$ кН*с/м – демпфирование

Параметры нагрузки

- направление – вдоль оси стержня
- амплитуда возмущающей силы $P_x = 1000$ кН;
- возмущающая частота – переменная, прямо пропорционально зависит от времени;
- закон изменения приложенной нагрузки $P_x(t) = 1000 \cdot \sin(10 \cdot t \cdot |t|)$
- $m = 1000$ т сосредоточенная масса на консольном конце стержня;

Параметры распределённого демпфирования

- распределённое демпфирование отсутствует

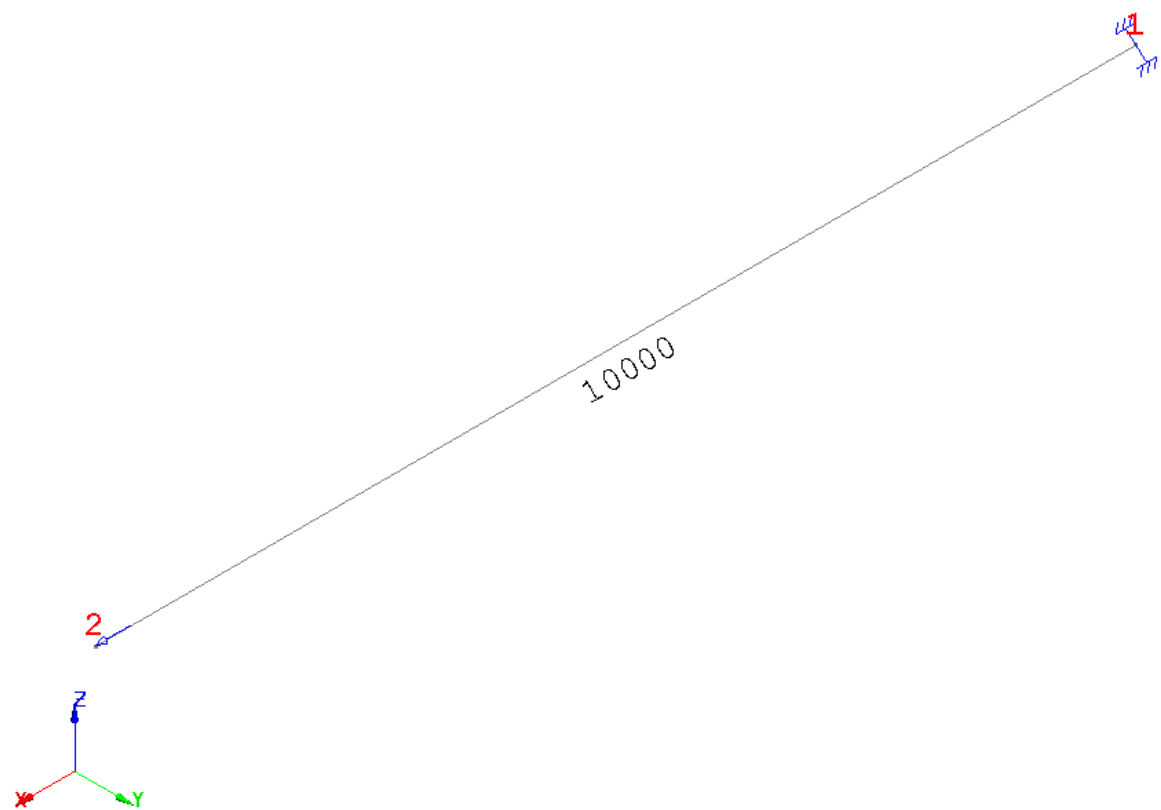
Параметры расчёта

- $\Delta t = 0.001\text{c}$ - шаг интегрирования по времени
- Время счёта $t = 7\text{ c}$

3.3. Расчетная модель

Консольная балка аппроксимируется одним прямолинейным участком (суперэлементом) с одним отрезком, (рис. 3.2, 3.3). Динамическая модель включает 3 динамические степени свободы и представлена на рис. 3.4.

Исходный трубопровод

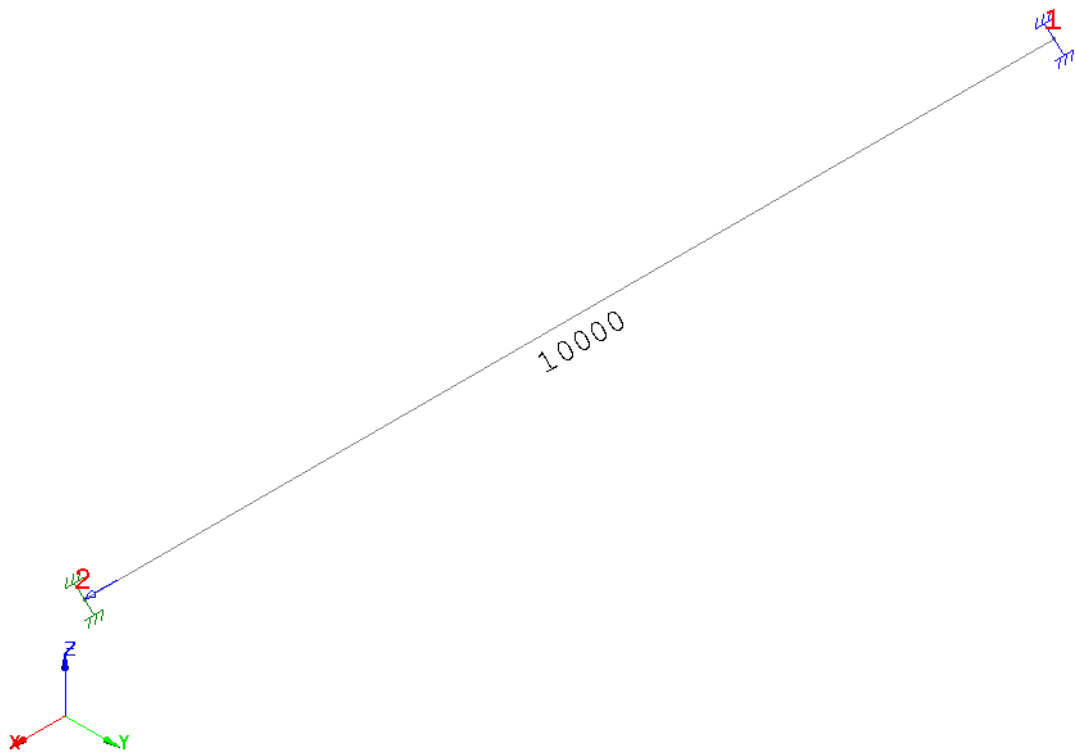


АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 3.2. Расчетная АСТРА-модель. Вариант без демпфера



Исходный трубопровод



АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 3.3. Расчетная АСТРА-модель. Вариант с сосредоточенным демпфером на консоли

Динамические степени свободы



АСТРА-АЭС'2019 (201911). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 3.4. Динамическая модель

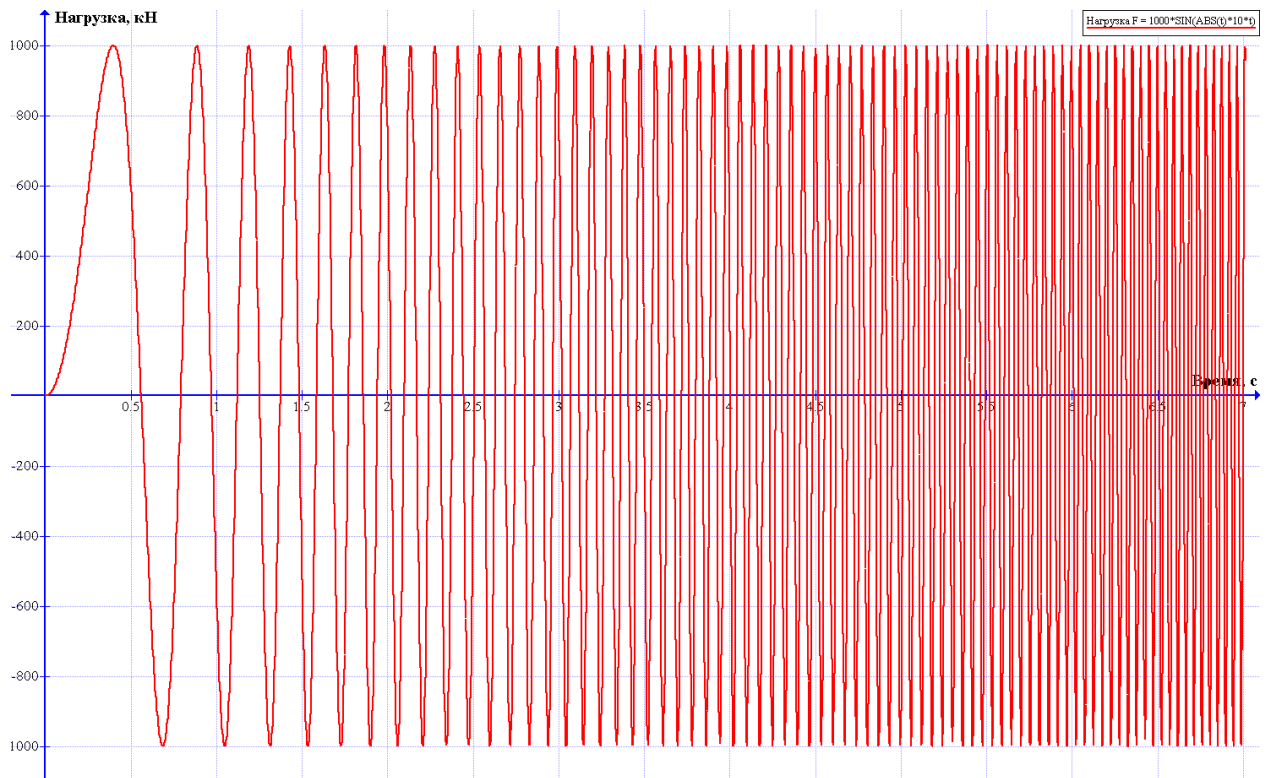


Рис. 3.5. Динамическая нагрузка во времени 0-7 с

3.4. Методика расчета

Для каждого шага по времени были определены перемещения консольного конца стержня. Расчёт проведён по *АСТРА-НОВА 202005* и по *ANSYS* прямым методом. Интегрирование уравнений движения выполнялось методом Ньюмарка с параметрами устойчивости $\alpha = 0,25$, $\delta = 0,5$.

Расчёт проводился в двух вариантах: без демпфера и с демпфером.

3.5. Результаты

На рис. 3.6 – 3.7 представлены графики зависимостей перемещения консольного конца стержня от времени, полученные в программных комплексах *АСТРА-НОВА 202005* и *ANSYS*. Отметим достаточную близость полученных результатов (результаты во всём диапазоне практически идентичны), что позволяет судить об адекватности и достаточной разрешающей способности алгоритма расчета методом прямого интегрирования неустановившихся динамических процессов, заложенного в ПК *АСТРА-НОВА 202005*.

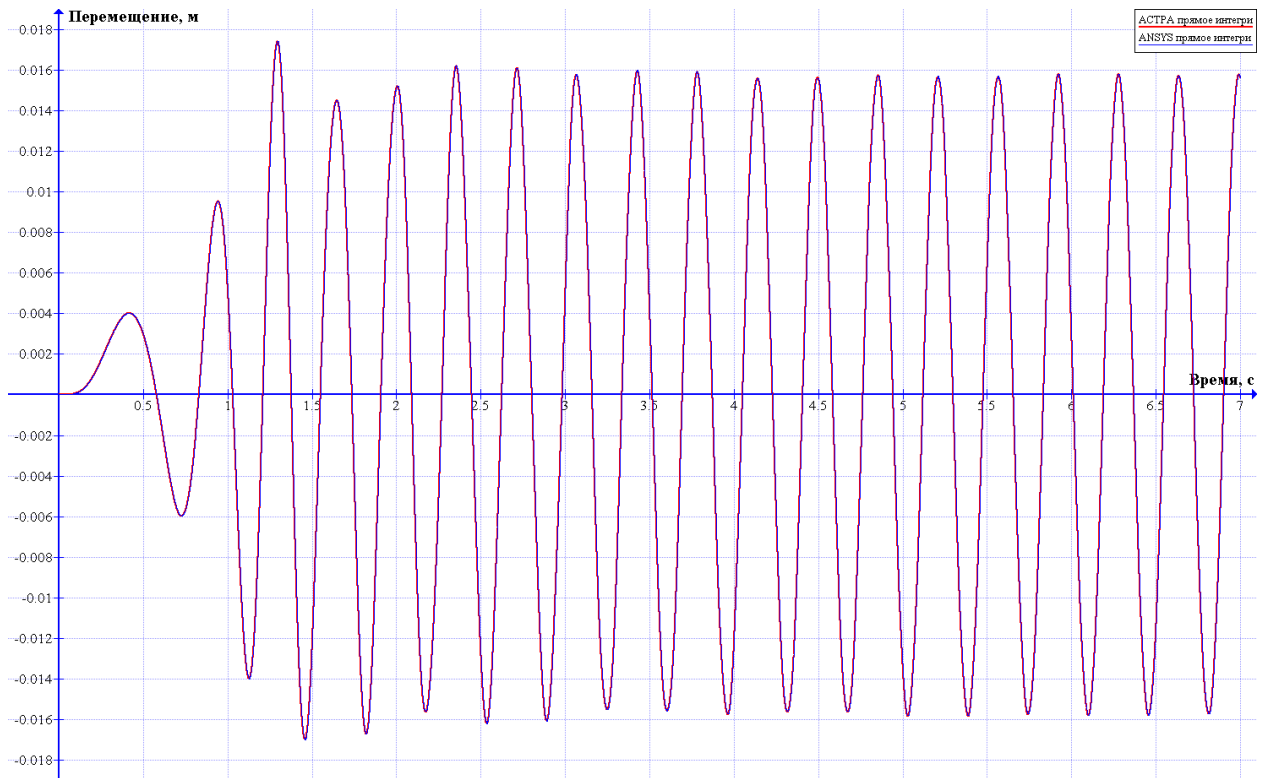


Рис. 3.6. Перемещения консольного конца, м. Расчёт без демпфера

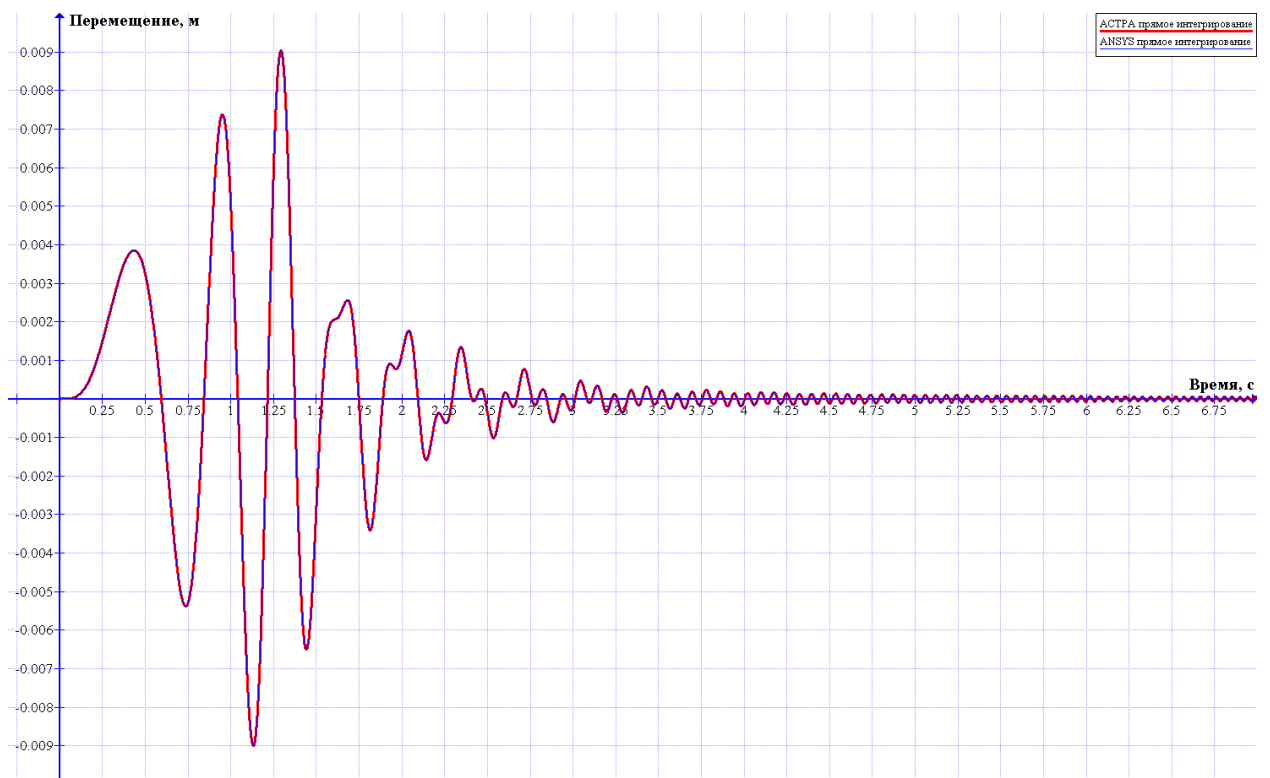


Рис. 3.7. Перемещения консольного конца. Модель с демпфером, м

Таблица 3.1

Результаты расчёта без демпфера

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

Таблица 3.2

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
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	-0.0009	-3.1e-006

Пример 4. Вынужденные неустановившиеся колебания консольного стержня.

Тип задачи	Динамический расчёт (неустановившиеся воздействия)
Тип(ы) верифицируемых элементов	Прямая труба, мертвая опора (заделка), пружинно-демпферная опора, сосредоточенная масса
Входной файл	C:\Users\STD\Desktop\Dyn\primer4.anp D:\awork\macro\primer4.mac

4.1. Постановка задачи

Рассматривается прямолинейный стержень, описанный в [1, стр 316, пример 11] и представленный на рис. 4.1.

Требуется провести сопоставление неустановившихся изгибных колебаний консольного конца под действием периодической силы P по времени, рассчитанных по комплексам программ АСТРА-НОВА 202005 (программа АСТРА-ДИН) и ANSYS [3].



Рис. 4.1. Расчетная схема задачи: консольный стержень

4.2. Исходные данные

Геометрические характеристики

- длина стержня $l = 2$ м;
- поперечное сечение - кольцо с наружным диаметром 150 мм и толщиной стенки 7.3 мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 204990$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;

Граничные условия (опоры)

- защемление (заделка) одного из концов.
- вязкоупругий демпфер в середине пролёта:
 $c_z = 50$ кН*с/м – демпфирование

Параметры нагрузки

- направление – поперёк оси стержня
- амплитуда возмущающей силы $P_z = 100$ кН;
- возмущающая частота $\theta = 20$ Гц;
- $m = 245,36$ кг/м – погонная масса стержня;

Параметры распределённого демпфирования

- $\delta = 0$ – декремент колебаний;
- $\alpha = 30$ с⁻¹ – коэффициент пропорциональности массы
- $\beta = 0,005$ с – коэффициент пропорциональности жёсткости.

Параметры расчёта

- $\Delta t = 0.001\text{c}$ - шаг интегрирования по времени
- Время счёта $t = 0,24\text{ c}$

4.3. Расчетная модель

Консольная балка аппроксимируется двумя прямолинейными участками (суперэлементами), каждый из которых состоит из 5-ти отрезков равной длины (рис. 4.2, 4.3). Динамическая модель включает 33 динамических степени свободы и представлена на рис. 4.4.

Исходный трубопровод

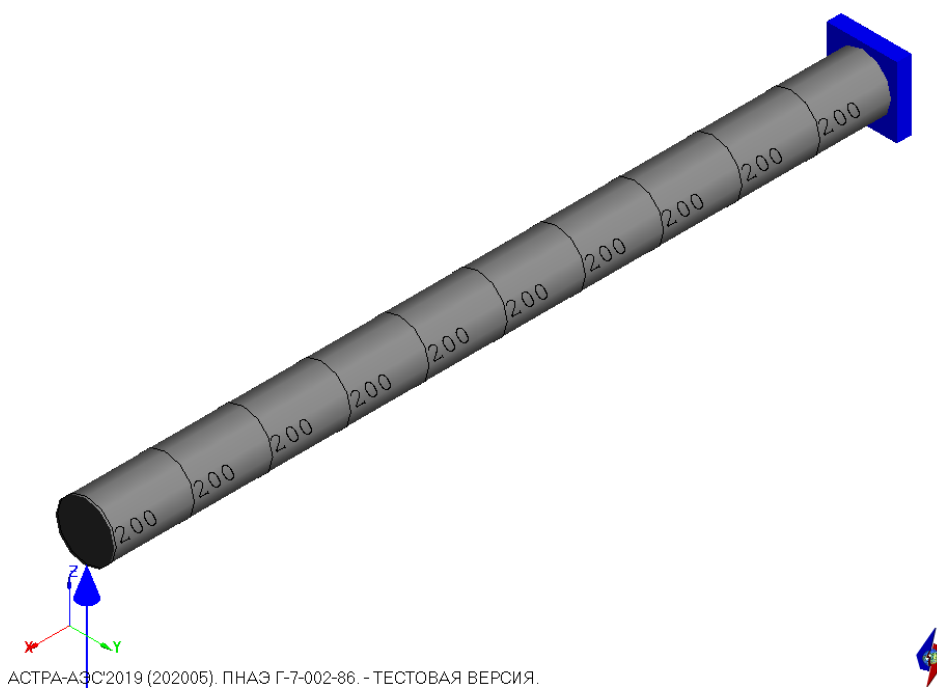


Рис. 4.2. Расчетная АСТРА-модель. Вариант без демпфера

Исходный трубопровод

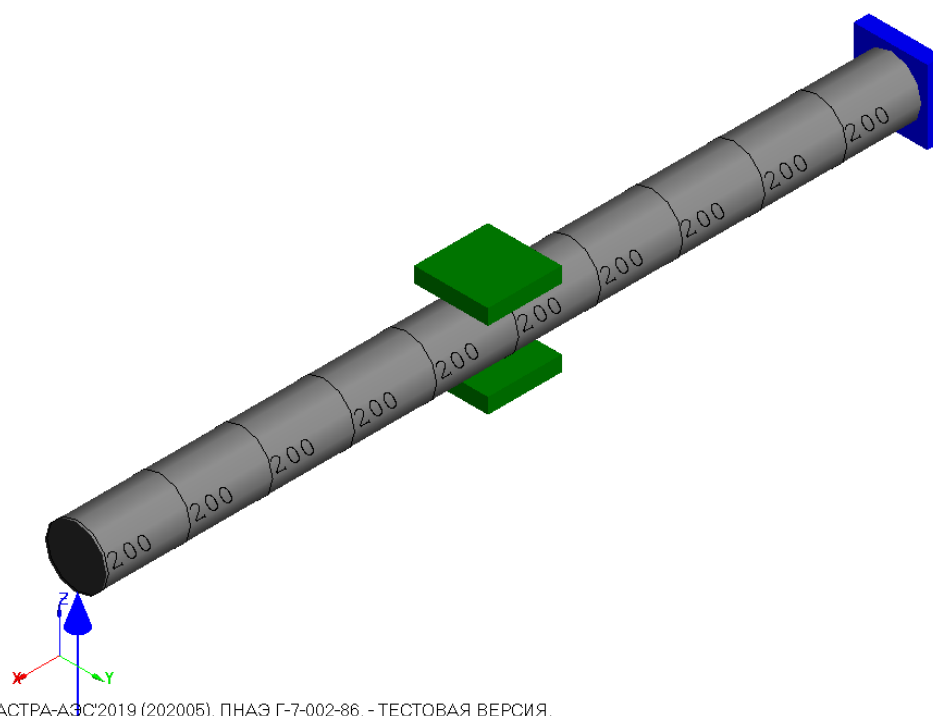


Рис. 4.3. Расчетная АСТРА-модель. Вариант с сосредоточенным демпфером в середине пролёта

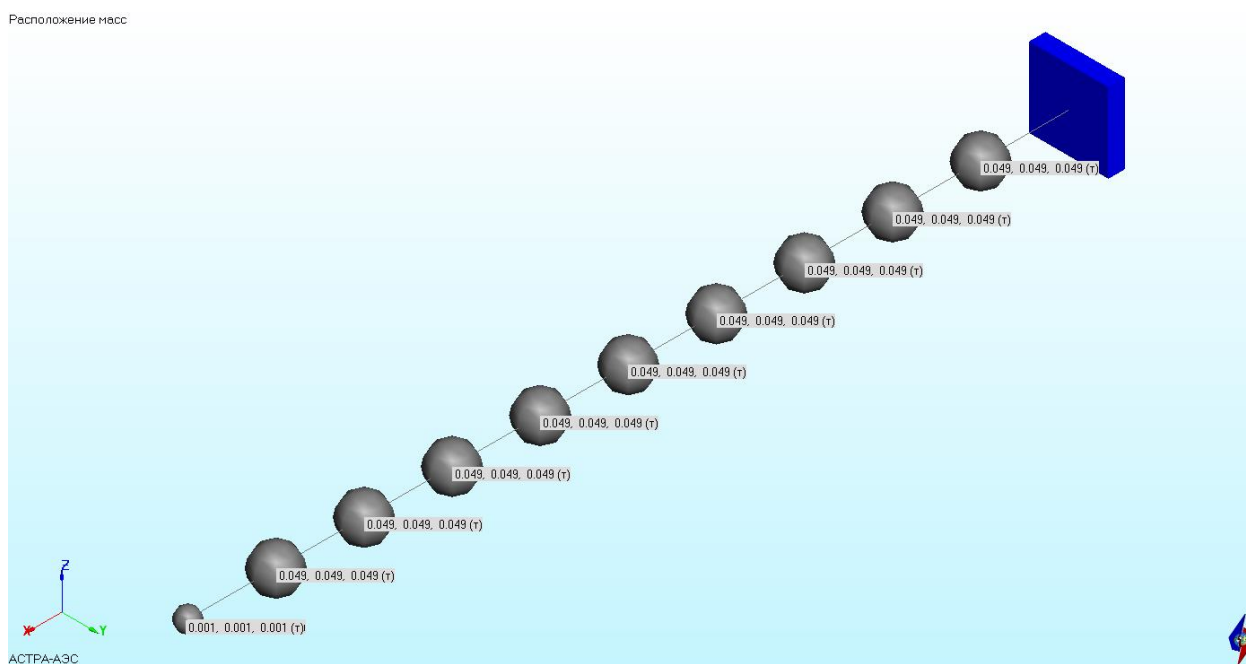


Рис. 4.4. Динамическая модель

4.4. Методика расчета

Для каждого шага по времени были определены перемещения консольного конца стержня. Расчёт проведён по *АСТРА-НОВА 202005* двумя методами: разложением по собственным формам (учтено 10 форм собственных колебаний) и прямым методом.; по *ANSYS* расчёт проведён прямым методом. При расчёте прямым методом интегрирование уравнений движения выполнялось методом Ньюмарка с параметрами устойчивости $\alpha = 0,25$, $\delta = 0,5$.

Прямым методом проведено 6 вариантов расчёта в зависимости от учёта демпфирования.

Таблица 4.1

Варианты учёта демпфирования

Номер расчёта	Сосредоточенный демпфер	Распределённое демпфирование	
		по массе	по жёсткости
Вариант № 1	–	–	–
Вариант № 2	–	+	–
Вариант № 3	–	–	+
Вариант № 4	–	+	+
Вариант № 5	+	–	–
Вариант № 6	+	+	+

4.5. Результаты

На рис. 4.5 – 4.7 представлены графики зависимостей перемещения консольного конца стержня от времени, полученные в программных комплексах АСТРА-НОВА 202005 и ANSYS. Отметим достаточную близость полученных результатов (результаты во всём диапазоне практически идентичны), что позволяет судить об адекватности и достаточной разрешающей способности алгоритма расчета методом прямого интегрирования неустановившихся динамических процессов, заложенного в ПК АСТРА-НОВА 202005.

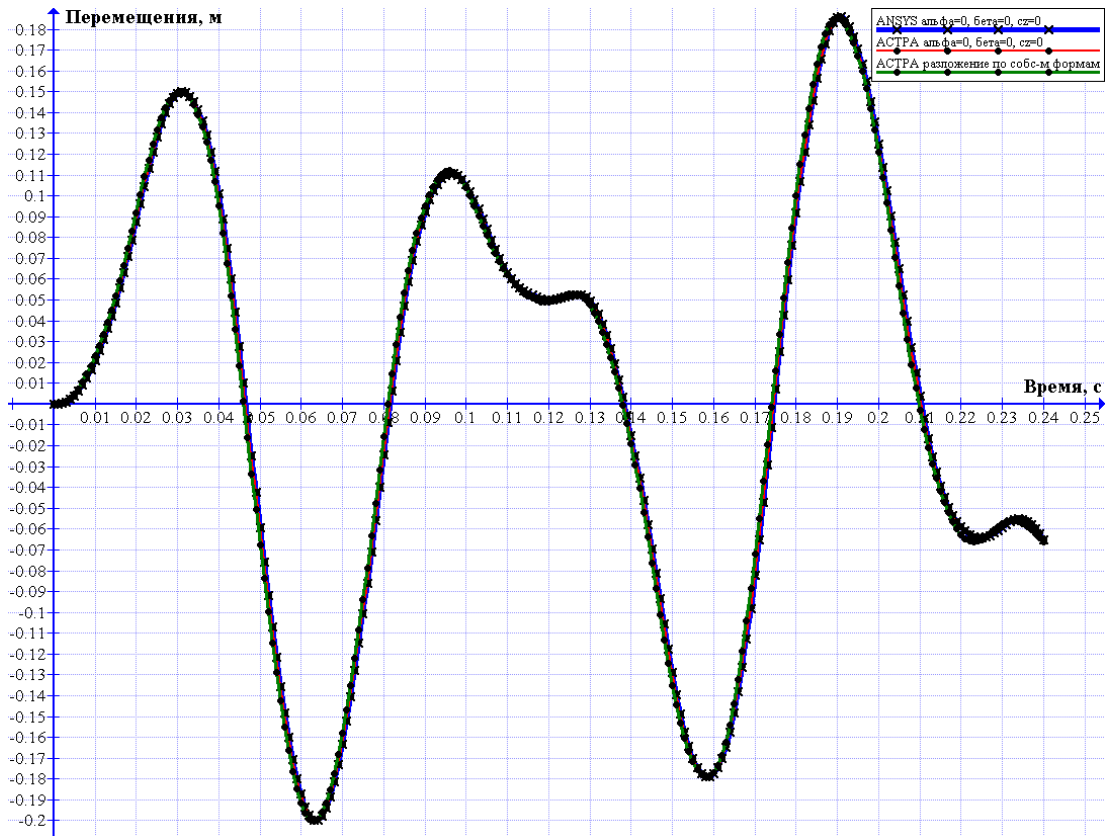


Рис. 4.5. Динамические перемещения консольного конца стержня, м.
Демпфирование отсутствует

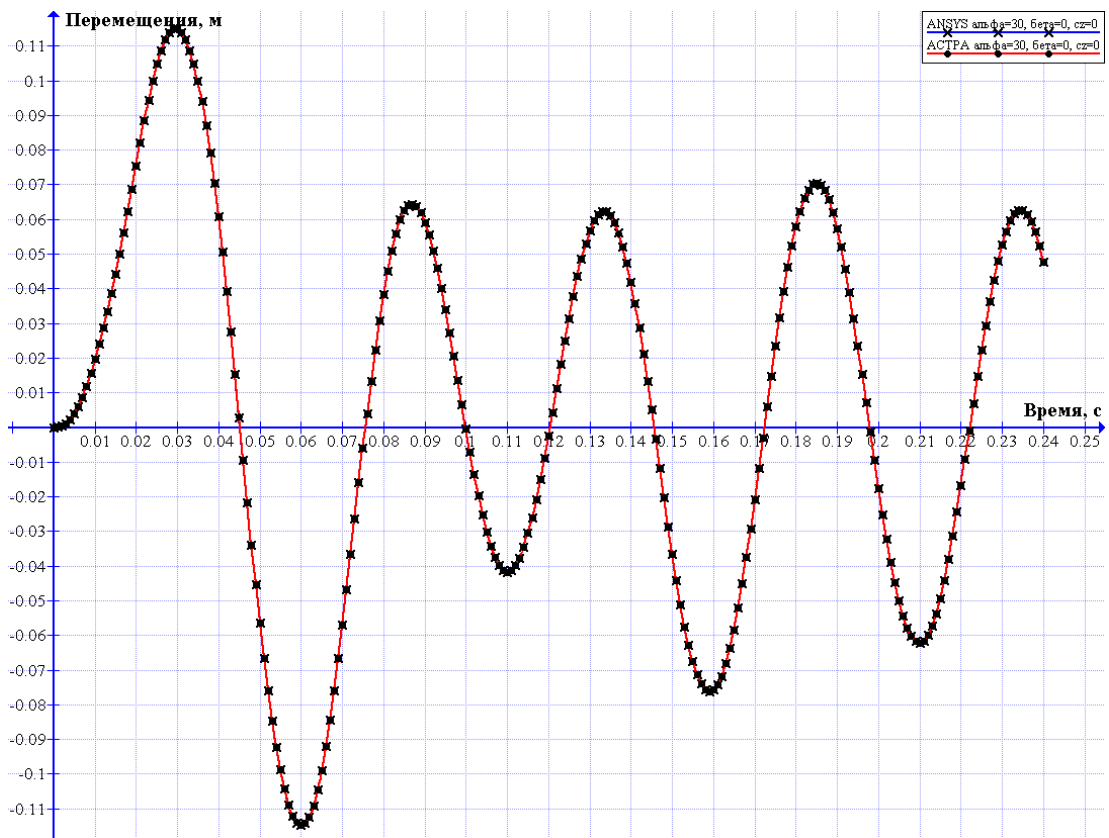


Рис. 4.6. Динамические перемещения консольного конца стержня, м.
Распределённое демпфирование по массе $\alpha = 30 \text{ с}^{-1}$, по жёсткости $\beta = 0 \text{ с}$,
сосредоточенного демпфера нет

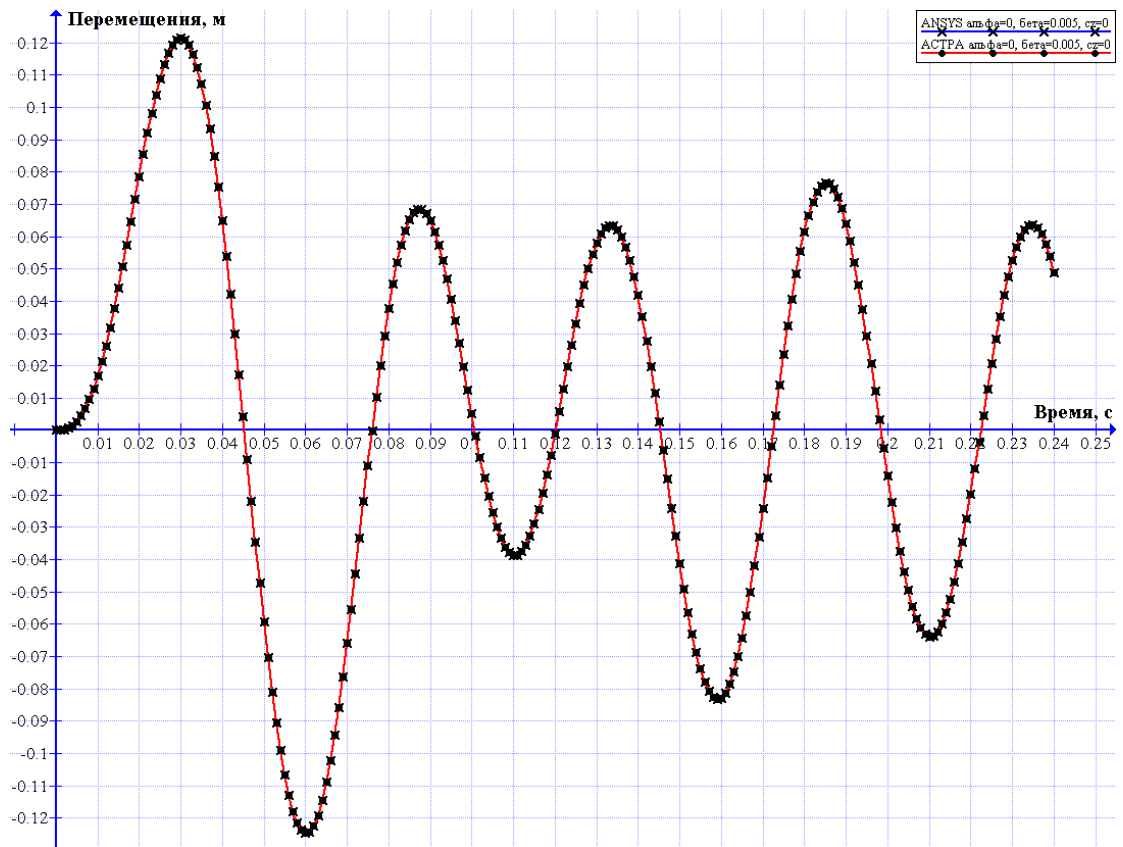


Рис. 4.7. Динамические перемещения консольного конца стержня, м.
 Распределённое демпфирование по массе $\alpha = 0 \text{ с}^{-1}$, по жёсткости $\beta = 0,005 \text{ с}$,
 сосредоточенного демпфера нет

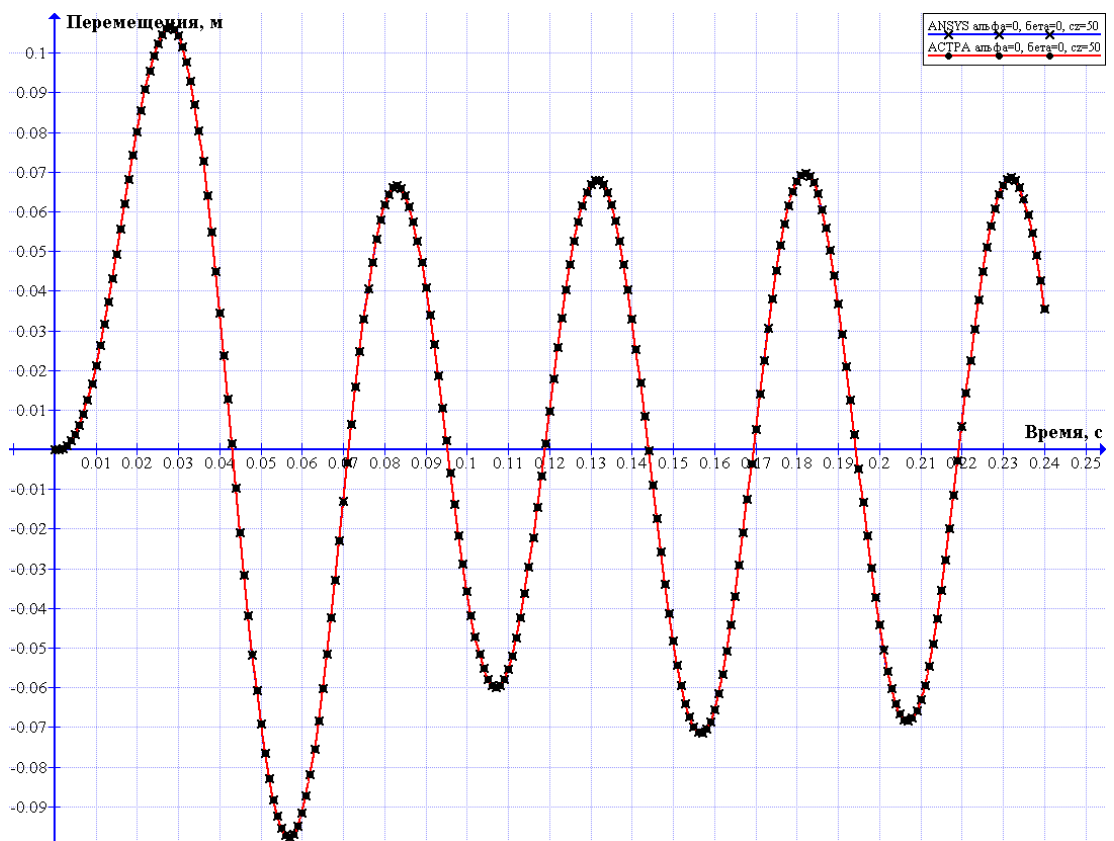


Рис. 4.8. Динамические перемещения консольного конца стержня, м.
 Распределённое демпфирование по массе $\alpha = 0 \text{ с}^{-1}$, по жёсткости $\beta = 0 \text{ с}$,
 сосредоточенный демпфер $c_z = 50 \text{ кН*с/м}$

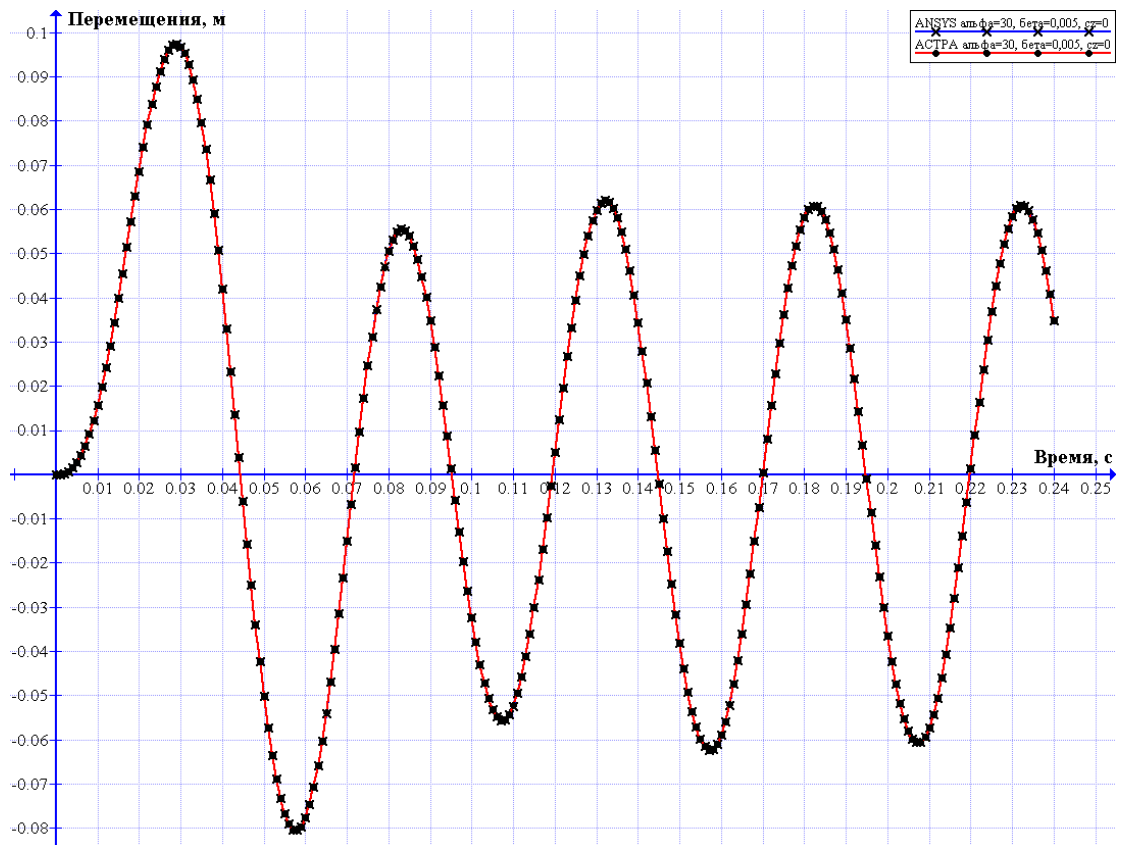


Рис. 4.9. Динамические перемещения консольного конца стержня, м.
 Распределённое демпфирование по массе $\alpha = 30 \text{ с}^{-1}$, по жёсткости $\beta = 0,005 \text{ с}$,
 сосредоточенного демпфера нет

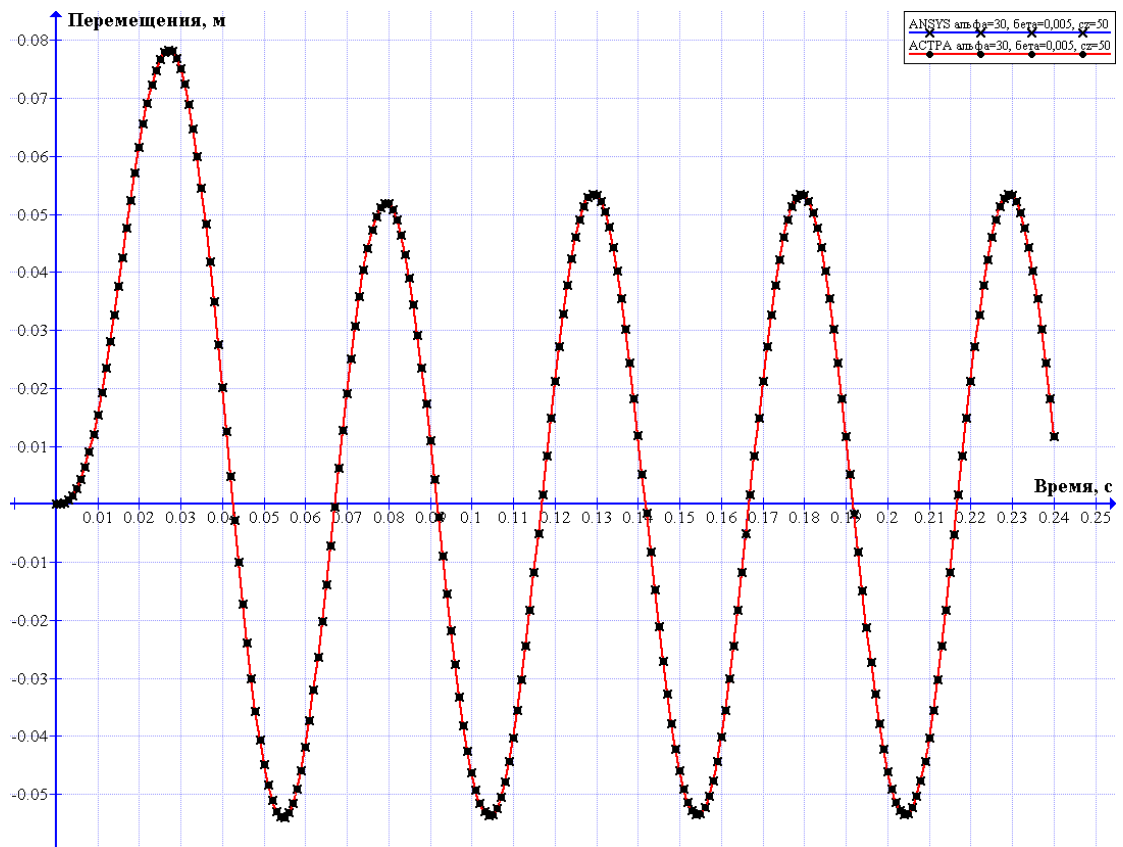


Рис. 4.10. Динамические перемещения консольного конца стержня, м.
 Распределённое демпфирование по массе $\alpha = 30 \text{ с}^{-1}$, по жёсткости $\beta = 0,005 \text{ с}$,
 сосредоточенный демпфер $c_z = 50 \text{ кН*с/м}$

Таблица 4.1

Результаты расчёта без сосредоточенных демпферов и без учёта распределённого α и β демпфирования (вариант № 1)

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-1.9953000E-01	1.8552000E-01
<i>ANSYS</i>	-1.9969500E-01	1.8594700E-01
<i>АСТРА-НОВА 202005¹</i>	-2.0026878E-01	1.8565733E-01
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,08	0,23

¹ – расчёт методом разложения по формам (для справки)

Таблица 4.2

Результаты расчёта без сосредоточенных демпферов и с учётом распределённого ($\alpha = 30 \text{ с}^{-1}$ и $\beta = 0 \text{ с}$) демпфирования.

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-1.147406010E-01	1.149378810E-01
<i>ANSYS</i>	-1.147480000E-01	1.149410000E-01
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,006	0,003

Таблица 2.3

Результаты расчёта без сосредоточенных демпферов и с учётом распределённого ($\alpha = 0 \text{ с}^{-1}$ и $\beta = 0,005 \text{ с}$) демпфирования.

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-1.246966710E-01	1.215122680E-01
<i>ANSYS</i>	-1.247020000E-01	1.215140000E-01
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,004	0,001

Таблица 2.4

Результаты расчёта с сосредоточенным демпфером $c_z = 50 \text{ кН*с/м}$ и без учёта распределённого ($\alpha = 0 \text{ с}^{-1}$ и $\beta = 0 \text{ с}$) демпфирования.

	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
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,004	0,001

Таблица 2.5

Результаты расчёта без сосредоточенных демпферов и с учётом распределённого ($\alpha = 30 \text{ с}^{-1}$ и $\beta = 0,005 \text{ с}$) демпфирования.

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	9.73917690E-02	-8.04827650E-02
<i>ANSYS</i>	9.73937000E-02	-8.04868000E-02
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,002	0,005

Таблица 2.6

Результаты расчёта с сосредоточенным демпфером $c_z = 50$ и с учётом распределённого ($\alpha = 30 \text{ с}^{-1}$ и $\beta = 0,005 \text{ с}$) демпфирования.

	Перемещения, U_x , м	
	минимум	максимум
<i>АСТРА-НОВА 202005</i>	-5.39668850E-02	7.83855590E-02
<i>ANSYS</i>	-5.39688000E-02	7.83867000E-02
δ , % (<i>АСТРА vs ANSYS</i>)	0,004	0,001

Пример 5. Вынужденные установившиеся колебания консольного стержня (АСТРА-ВИБР). Сопоставление с аналитическим решением и альтернативным программным комплексом¹

Тип задачи	Динамический расчёт (установившиеся воздействия)
Тип(ы) верифицируемых элементов	Прямая труба, мертвая опора (заделка), пружинно-демпферная опора, сосредоточенная масса
Входной файл	C:\Users\STD\Desktop\Dyn\primer5.anp D:\awork\macro\primer5.mac

5.1. Постановка задачи

Рассматривается прямолинейный тержень, описанный в примере 11 стр.316 тома 3 Справочника [1] и представленный на рис. 5.1.

Требуется по программному комплексу АСТРА-НОВА 202005 (программа АСТРА-ВИБР'2020) получить значения амплитуды виброперемещений точки нагружения периодической силой P для трех значений возмущающей частоты. Первая частота ($\theta = 10$ Гц) взята в дорезонансной области (см. табл. 9.1), вторая ($\theta = 15$ Гц) - в "близкой", третья ($\theta = 20$ Гц) - в "далекой" зарезонансной области.

Провести сравнение амплитуд виброперемещений с аналитическим решением [1], ранее аттестованной версией программы АСТРА-АЭС 6.1[2] и программным комплексом ANSYS [3].



Рис. 5.1. Консоль, нагруженная периодической силой P .

5.2. Исходные данные

Геометрические характеристики

- длина стержня $l = 2$ м;
- поперечное сечение - кольцо с наружным диаметром 150 мм и толщиной стенки 7.3 мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 204990$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;

Граничные условия (опоры)

- защемление (заделка) одного из концов;
- вязкоупругий демпфер в середине пролёта:
 $c_z = 50$ кН*с/м – демпфирование

Параметры нагрузки

- направление – поперёк оси стержня

¹ Пример 11 в верификационном отчете ПК АСТРА-АЭС 6.1, 1995 г.

- $P_z = 100$ кН – амплитуда возмущающей силы;
- $\theta = 10, 15$ и 20 Гц – возмущающие частоты;
- $m = 245,36$ кг/м – погонная масса стержня;

Параметры распределённого демпфирования

- $\delta = 0$ – декремент колебаний;
- $\alpha = 30$ с⁻¹ – коэффициент пропорциональности массы
- $\beta = 0,005$ с – коэффициент пропорциональности жёсткости.

5.3. Расчетная модель

Консольная балка аппроксимируется двумя прямолинейными участками (суперэлементами), каждый из которых состоит из 5-ти отрезков равной длины (рис. 5.2, 5.3). Динамическая модель включает 33 динамических степени свободы и представлена на рис. 5.4.

Исходный трубопровод

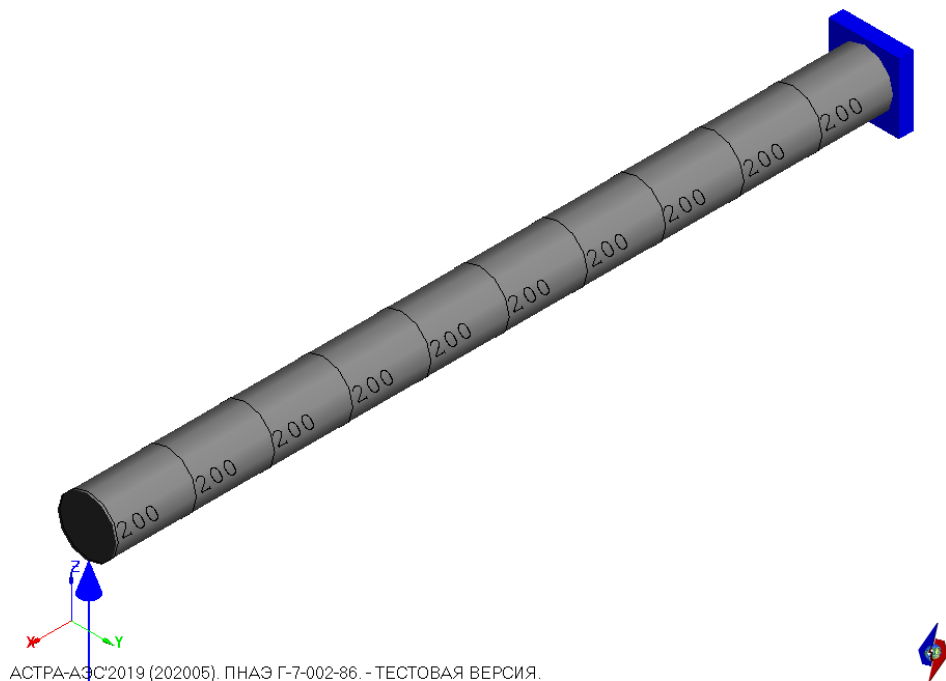
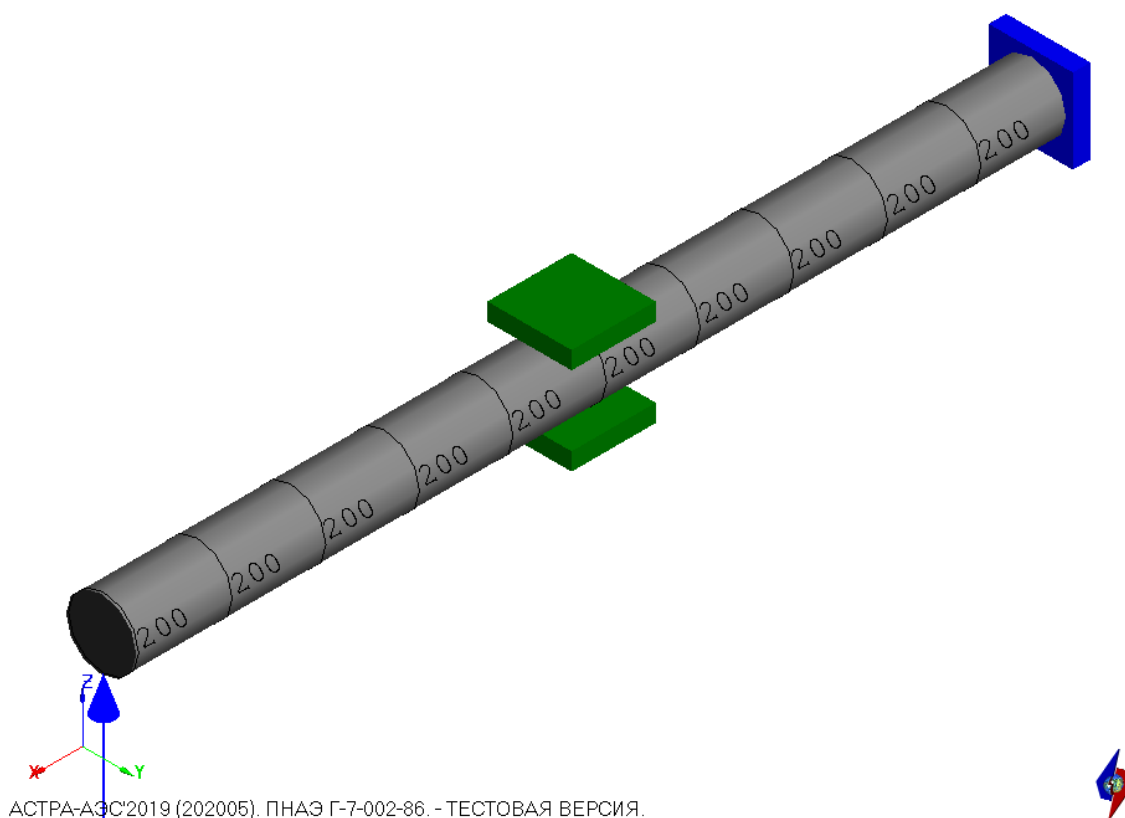


Рис. 5.2. Расчетная АСТРА-модель

Исходный трубопровод



АСТРА-АЭС'2019 (202005). ПНАЭ Г-7-002-86. - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 5.3. Расчетная АСТРА-модель с демпфером в середине пролёта

Расположение масс



Рис. 5.4. Динамическая модель

5.4. Результаты

5.4.1. Аналитическое решение

Аналитическое решение для вынужденных колебаний консольно закрепленного стержня представлено в [1] на стр. 316. В ходе аналитического решения определяется

прогиб свободного конца консольной балки при действии на него возмущающей силы $P_z \cdot \sin \theta t$.

$$Z = \frac{P_z}{\alpha^3 EJ} \cdot \frac{U(\alpha l) \cdot T(\alpha l) - V(\alpha l) \cdot S(\alpha l)}{T(\alpha l) \cdot V(\alpha l) - S^2(\alpha l)}$$

где

P_z – возмущающая поперечная сила;

l – длина балки;

E – модуль упругости;

J – момент инерции сечения;

$U, T, V, S(\alpha l)$ – функции Крылова.

Параметр α вычисляется по формуле ([1], стр. 294):

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{m\theta^2}{EJ}},$$

где

θ – частота возмущающей силы(рад/с);

m – погонная масса стержня.

$$\alpha(\theta_1) = 0.868$$

$$\alpha(\theta_2) = 1.063$$

$$\alpha(\theta_3) = 1.227$$

Зная параметр α можно вычислить Z :

$$Z(\theta_1) = 0.5742 \text{ м}$$

$$Z(\theta_2) = 0.2279 \text{ м}$$

$$Z(\theta_3) = 0.0734 \text{ м}$$

5.4.2. Численное решение

При расчете для каждой из трех заданных частот вынуждающей силы были определены амплитуды перемещений консольного конца стержня. Расчёт проведён по *АСТРА-НОВА 202005* двумя методами: разложением по собственным формам (учтено 10 низших форм собственных колебаний) и полным; по *ANSYS* расчёт проведён полным методом.

Проведено 6 вариантов расчёта в зависимости от учёта демпфирования.

Таблица 5.1

Варианты учёта демпфирования

Номер расчёта	Сосредоточенный демпфер	Распределённое демпфирование	
		по массе	по жёсткости
Вариант № 1	–	–	–
Вариант № 2	–	+	–
Вариант № 3	–	–	+
Вариант № 4	–	+	+
Вариант № 5	+	–	–

Вариант № 6	+	+	+
-------------	---	---	---

5.4.3. Сопоставление результатов

Таблица 5.2

Расчёты без демпфирования (сосредоточенного и распределённого)
(вариант № 1)

Вариант	U _z , м		
	θ = 10 Гц	θ = 15 Гц	θ = 20 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 ¹	0,64053	0,21170	0,07024
АСТРА-НОВА 202005 ²	0,64044	0,21121	0,07017
ANSYS*	0,64081	0,21109	0,07008
δ, % (расчет vs теория)	12,02	7,02	4,11

¹ – полный метод;

² – разложение по собственным формам;

* – для справки (полный метод).

Таблица 5.3

Расчёты с распределённым α и β демпфированием. Полный метод

Вариант	U _z , м		
	θ = 10 Гц	θ = 15 Гц	θ = 20 Гц
Распределённое демпфирование α = 30 с ⁻¹ , β = 0 с ⁻¹ (вариант № 2)			
АСТРА-НОВА 202005	0,35429	0,16783	0,06622
ANSYS	0,35435	0,16753	0,06609
δ, % (АСТРА vs ANSYS)	0,02	0,18	0,20
Распределённое демпфирование α = 0 с ⁻¹ , β = 0,005 с (вариант № 3)			
АСТРА-НОВА 202005	0,39040	0,17786	0,06940
ANSYS	0,39045	0,17767	0,06925
δ, % (АСТРА vs ANSYS)	0,01	0,11	0,22
Распределённое демпфирование α = 30 с ⁻¹ , β = 0,005 с (вариант № 4)			
АСТРА-НОВА 202005	0,21587	0,12318	0,06127
ANSYS	0,21585	0,12308	0,06117
δ, % (АСТРА vs ANSYS)	0,01	0,08	0,16

Таблица 5.4

Расчёты с демпфером (в середине пролёта, демпфирование c = 50 кН*с/м). Полный метод
(вариант № 5)

Вариант	U _z , м		
	θ = 10 Гц	θ = 15 Гц	θ = 20 Гц
АСТРА-НОВА 202005	0,2471	0,14797	0,06928
ANSYS	0,2478	0,14783	0,06917
δ, % (АСТРА vs ANSYS)	0,28	0,09	0,16

Таблица 5.5

Расчёты с демпфером (в середине пролёта, демпфирование c = 50 кН*с/м) и с распределённым демпфированием (α = 30 с⁻¹, β = 0,005 с). Полный метод (вариант № 6)

Вариант	U _z , м		
	θ = 10 Гц	θ = 15 Гц	θ = 20 Гц

<i>ACTPA-HOBA 202005</i>	0,12724	0,08426	0,05367
<i>ANSYS</i>	0.12723	0.08424	0.05362
δ , % (<i>ACTPA vs ANSYS</i>)	0,01	0,02	0,09

Пример 6. Вынужденные неустановившиеся колебания трубопроводной системы при действии сейсмических воздействий

Источник(и)	
Тип задачи	Динамический расчёт (неустановившиеся воздействия)
Тип(ы) верифицируемых элементов	Прямая труба, мертвая опора (заделка), пружинно-демпферная опора, сосредоточенная масса
Входной файл	C:\Users\STD\Desktop\Dyn\Primer6_DYN_FORCE.anp

6.1. Постановка задачи

Рассматривается реальная пространственная разветвлённая трубопроводная система с сосредоточенным демпфером, представленная на рис. 6.1.

Требуется провести сопоставление неустановившихся колебаний (при различных значениях демпфирования сосредоточенного демпфера) под действием двух вариантов трёхкомпонентной акселерограммы, и рассчитанных по комплексу программ АСТРА-НОВА 202005.

6.2. Исходные данные

Граничные условия (опоры)

- вязкоупругий демпфер в середине пролёта:
 $c_x = 0, 25, 50, 100$ кН*с/м – варианты значений демпфирования

Параметры нагрузки

- вариант № 1: трёхкомпонентная акселерограмма продолжительностью 25 с
- вариант № 2: трёхкомпонентная акселерограмма, продолжительностью 6 с (первые 6 с акселерограммы варианта № 1) – «оборванная» акселерограмма

Параметры распределённого демпфирования (получены для диапазона частот 2,5 – 33 Гц и демпфирования 2%)

- $\alpha = 0.5840707$ с⁻¹ – коэффициент пропорциональности массы;
- $\beta = 0.00017933$ с – коэффициент пропорциональности жёсткости.

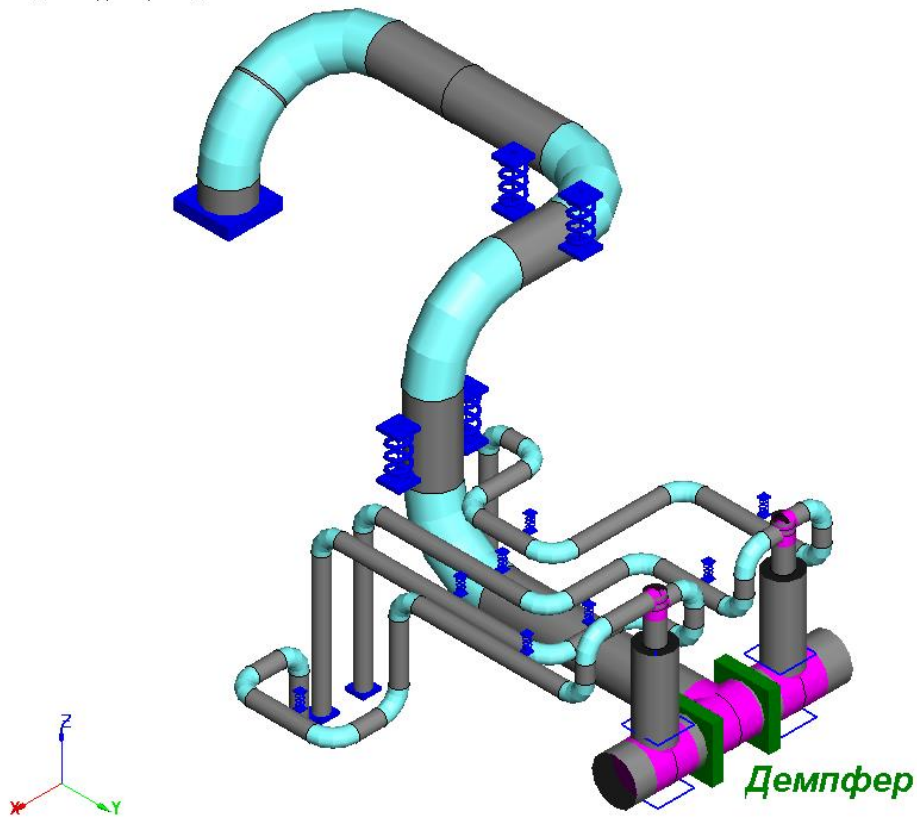
Параметры расчёта

- $\Delta t = 0.01$ с - шаг интегрирования по времени;
- Время счёта $t = 30$ с

6.3. Расчетная модель

Система состоит из 16 участков-суперэлементов, включающих в себя 47 прямых труб, 29 отводов, 7 тройниковых соединений (рис. 6.1). Динамическая модель включает 381 динамических степени свободы и представлена на рис. 6.2.

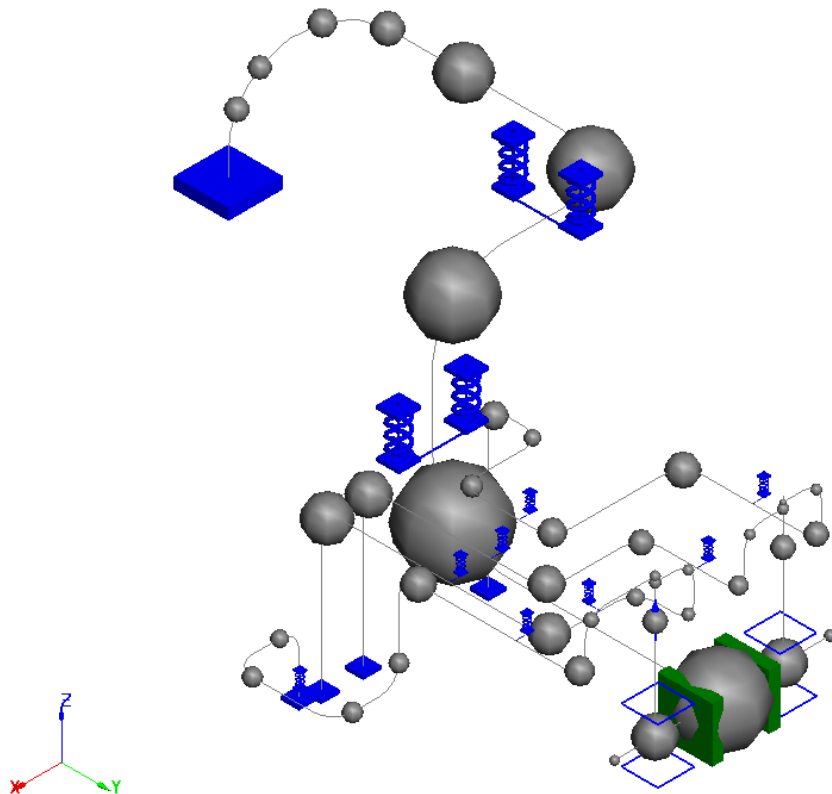
Исходный трубопровод



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

Рис. 6.1. Расчётная АСТРА-модель. Демпфер в зоне тройника 820x820. Демпфирование по оси X ГСК

Динамические степени свободы



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

Рис. 6.2. Динамическая АСТРА-модель

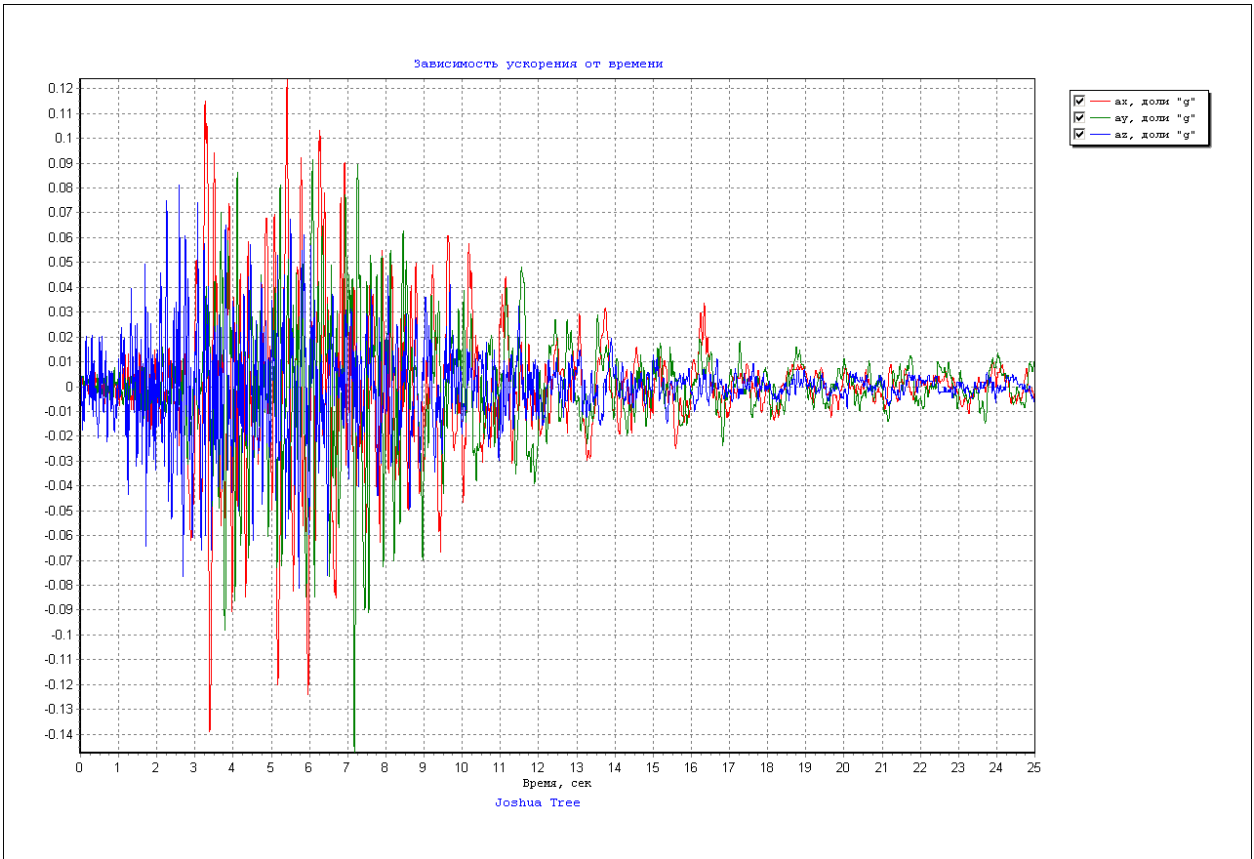


Рис. 6.3. Расчётная трёхкомпонентная акселерограмма (0-25 с)

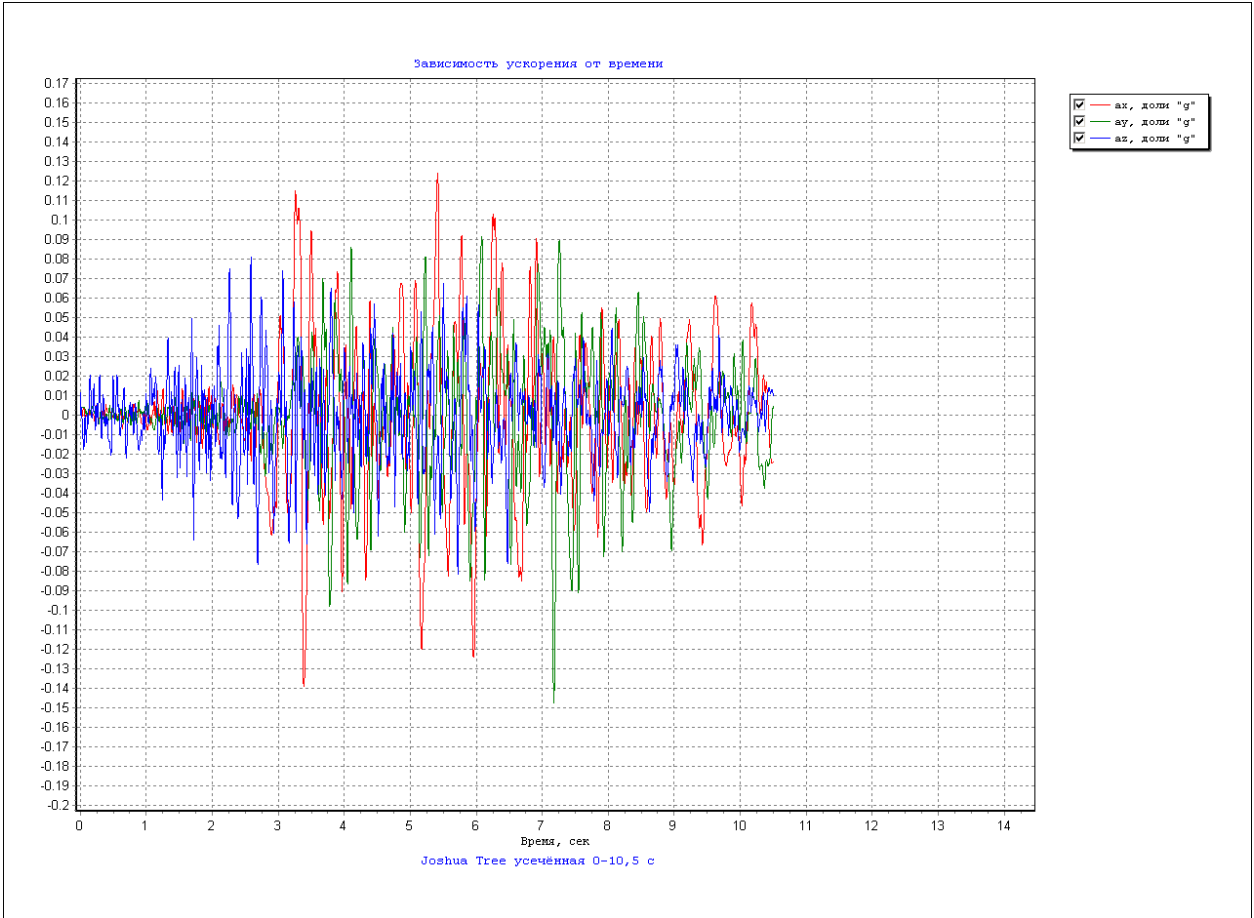


Рис. 6.4. Расчётная трёхкомпонентная акселерограмма (0-10,5 с) «оборванная»

6.4. Методика расчета

Для каждого шага по времени были определены перемещения тройникового узла 820x820 с установленным в нём демпфером. Расчёт проведён по *АСТРА-НОВА 202005* прямым методом. При расчёте прямым методом интегрирование уравнений движения выполнялось методом Ньюмарка с параметрами устойчивости $\alpha = 0,25$, $\delta = 0,5$.

Прямым методом проведено 8 вариантов расчёта в зависимости от учёта демпфирования.

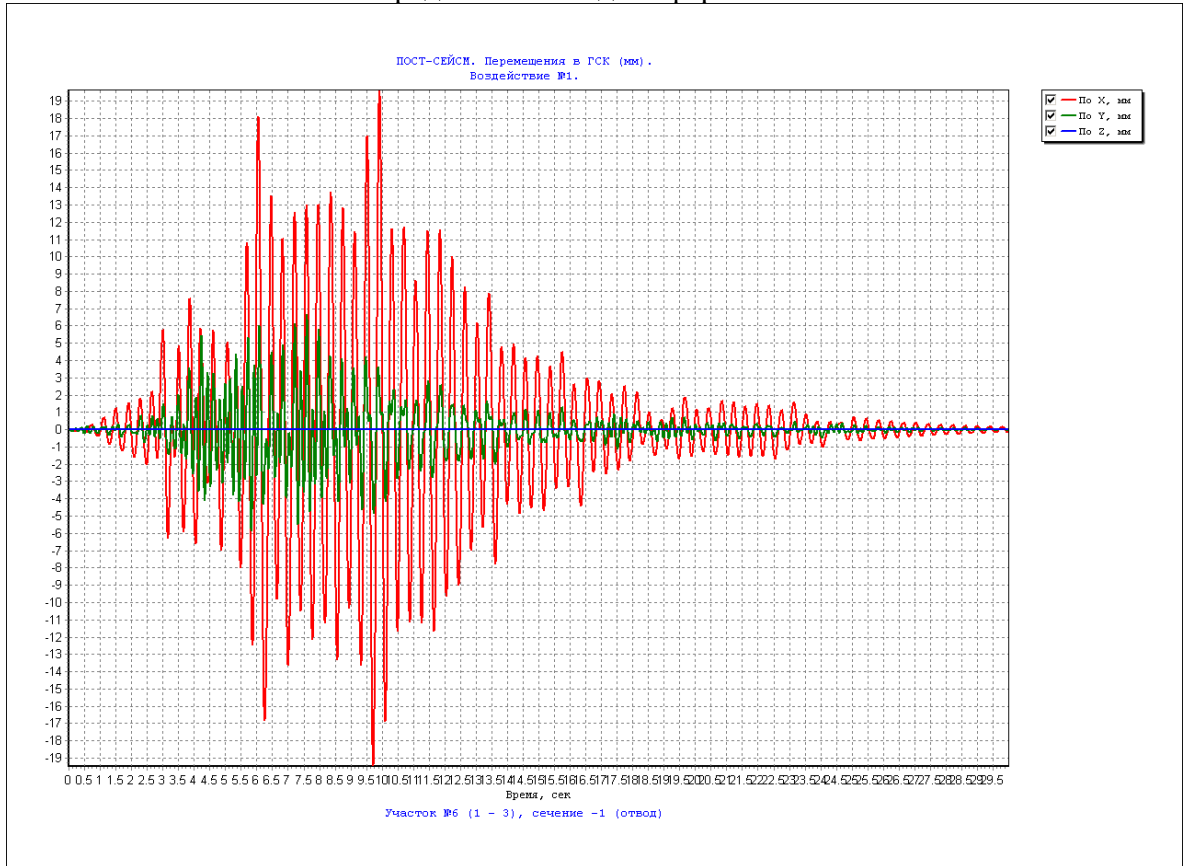
Таблица 4.1

Варианты расчёта	
Номер расчёта	Сосредоточенный демпфер, кН*с/м
Акселерограмма № 1	
Вариант № 1	0
Вариант № 2	25
Вариант № 3	50
Вариант № 4	100
Акселерограмма № 2 (усечённая)	
Вариант № 5	0
Вариант № 6	25
Вариант № 7	50
Вариант № 8	100

6.5. Результаты

На рис. 6.5–6.8 представлены графики зависимостей расчетных перемещений тройникового узла 820x820 от времени, полученные в программном комплексе АСТРА-НОВА 202005 для всех вариантов, указанных в таблице 4.1. Отметим количественное подтверждение ожидаемой обратной зависимости максимальных расчетных перемещений от значения демпфирования сосредоточенного демпфера и, разумеется, более быстрое затухание колебаний.

Сосредоточенный демпфер 0 кН*с/м



Сосредоточенный демпфер 25 кН*с/м

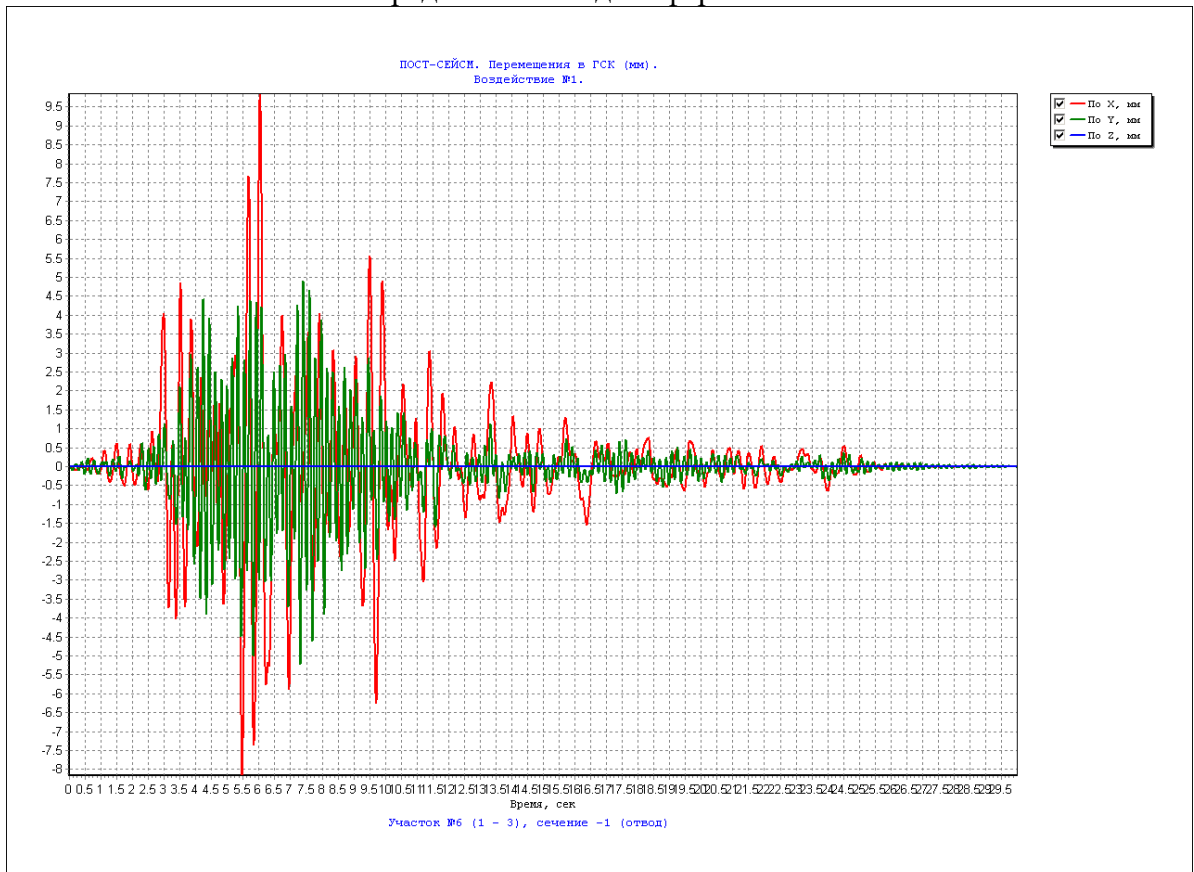
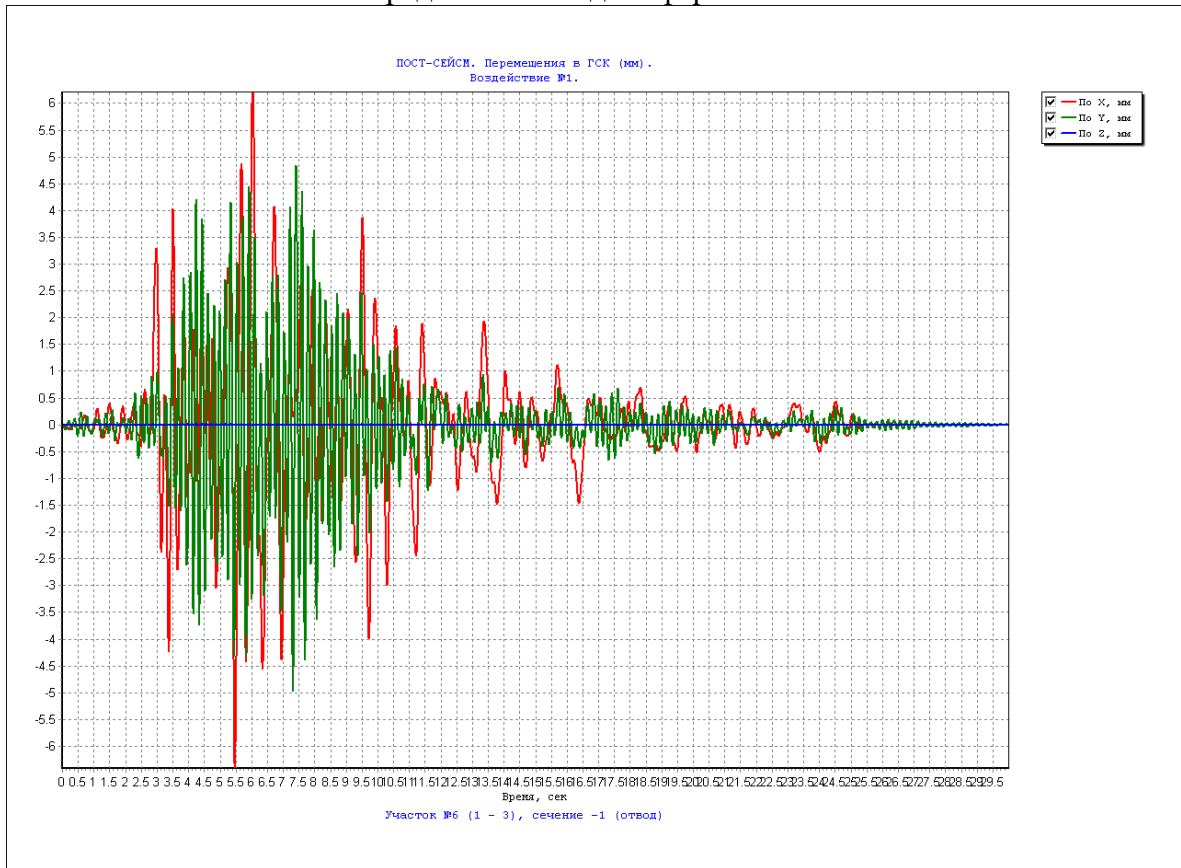


Рис. 6.5. Сейсмические перемещения в треугольном узле с демпфером, мм

Сосредоточенный демпфер 50 кН*с/м



Сосредоточенный демпфер 100 кН*с/м

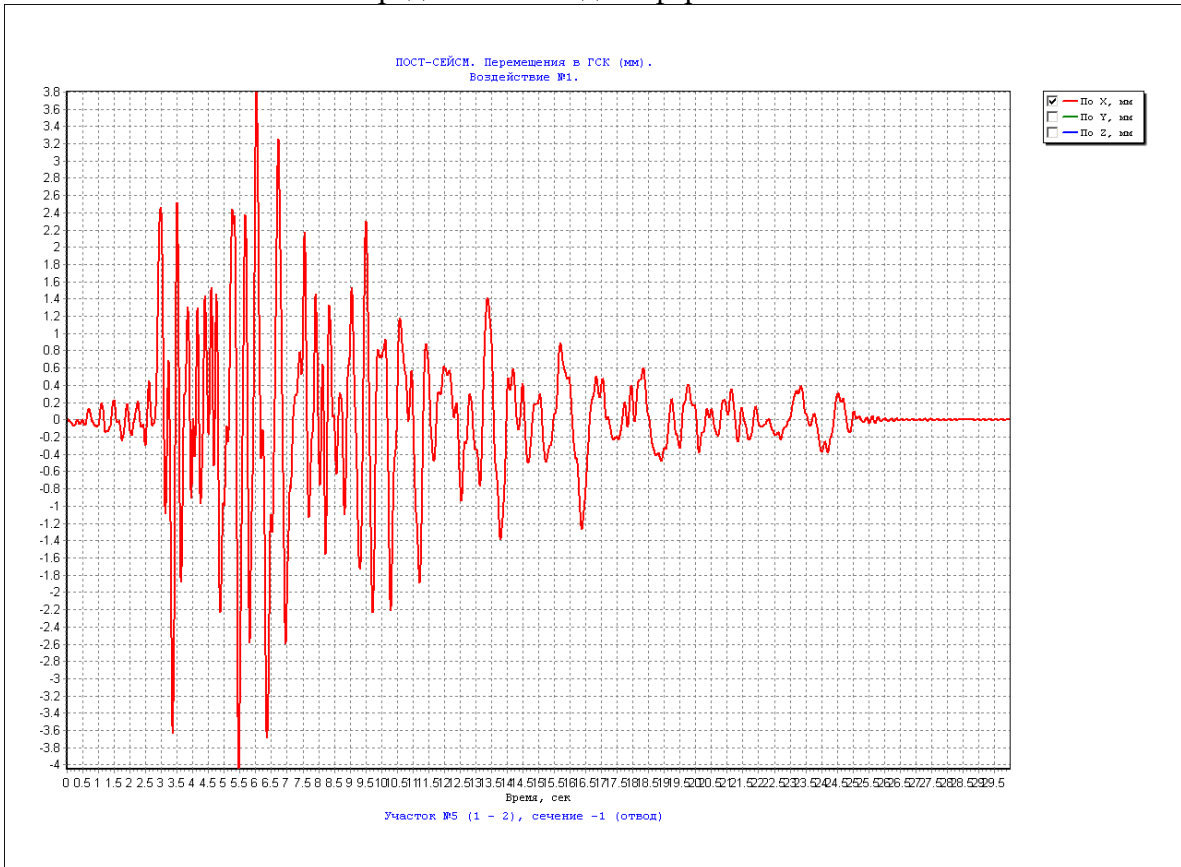
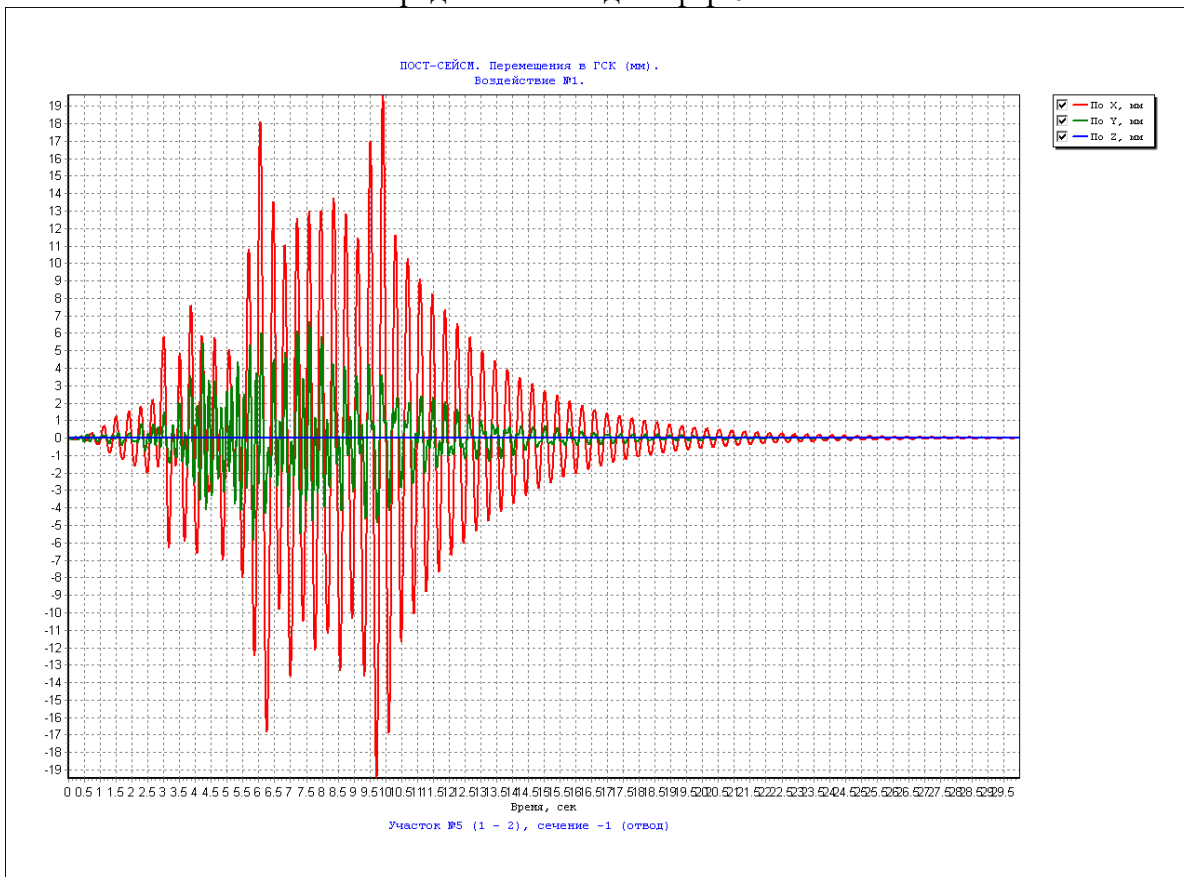


Рис. 6.6. Сейсмические перемещения в тройниковом узле с демпфером, мм

Сосредоточенный демпфер 0 кН*с/м



Сосредоточенный демпфер 25 кН*с/м

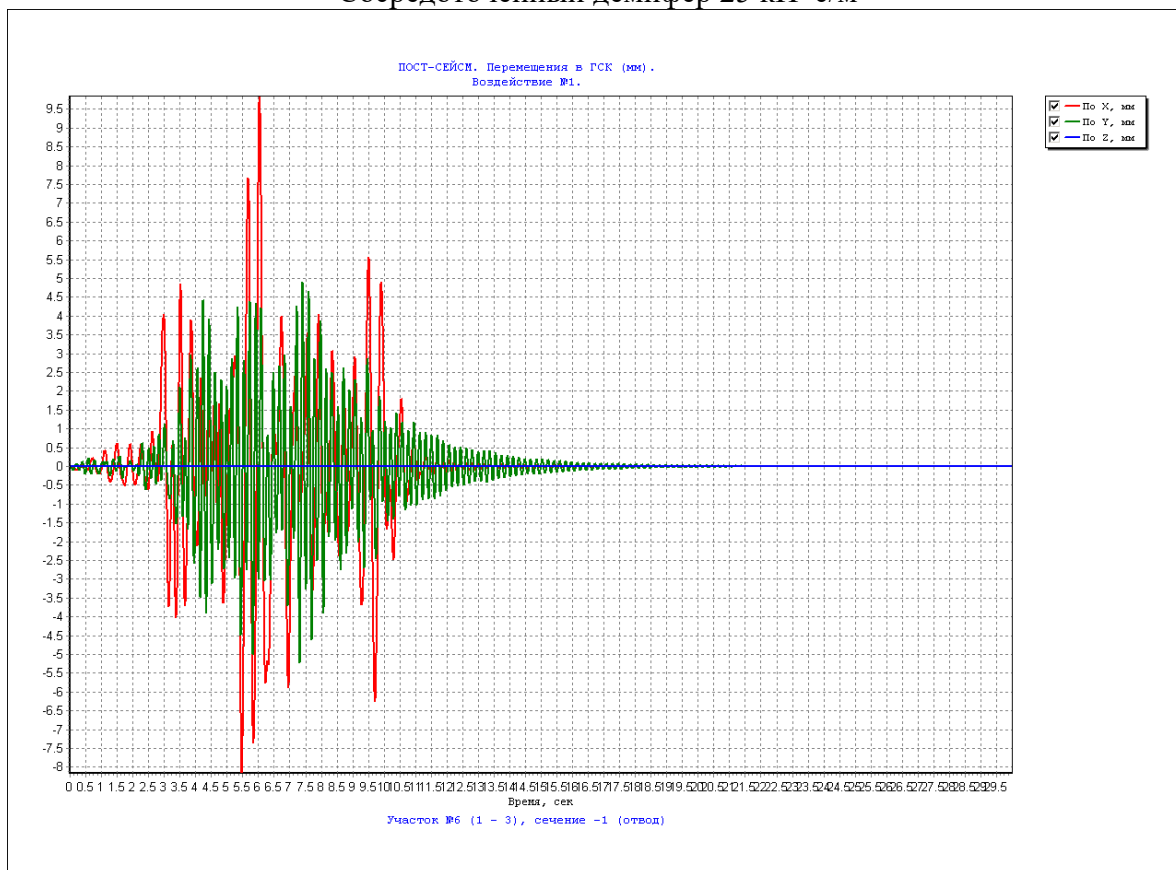
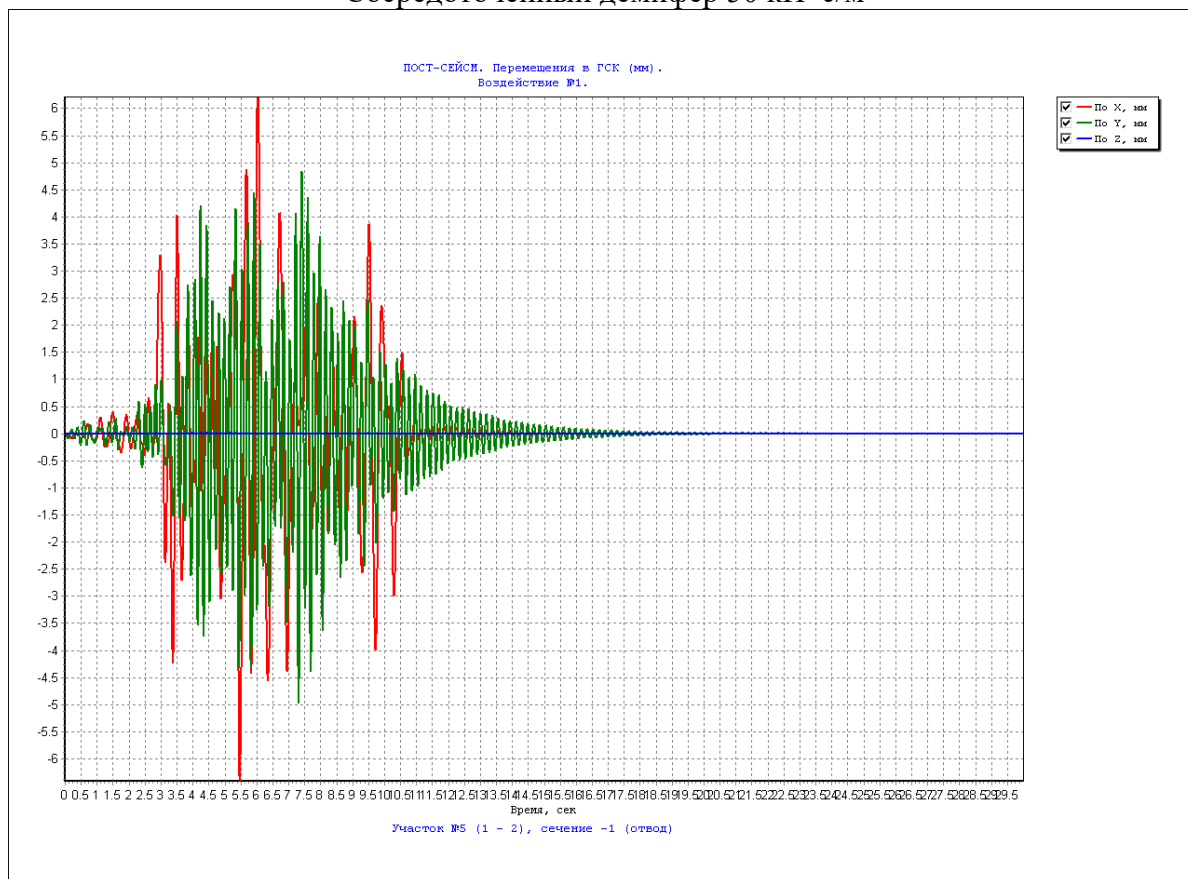


Рис. 6.7. Сейсмические перемещения в тройниковом узле с демпфером, мм

Сосредоточенный демпфер 50 кН*с/м



Сосредоточенный демпфер 100 кН*с/м

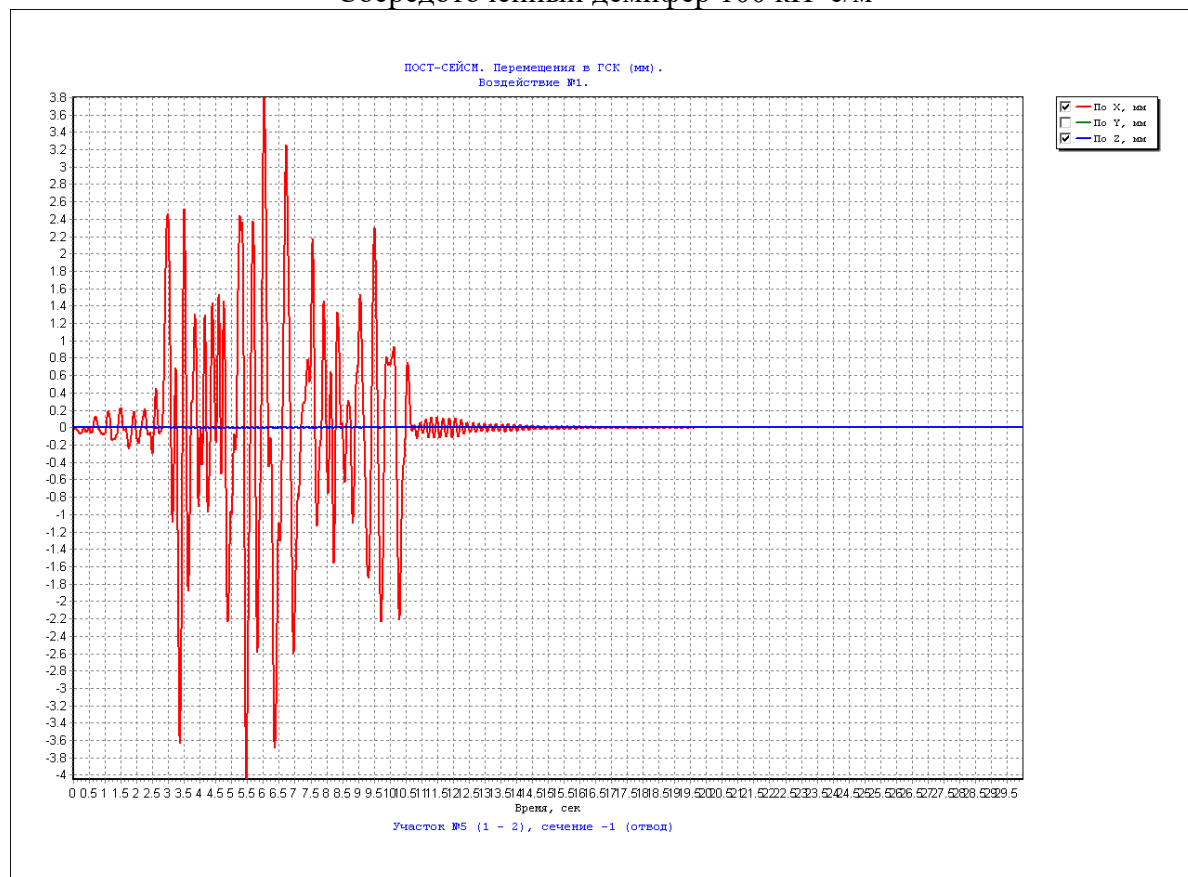


Рис. 6.8. Сейсмические перемещения в треугольном узле с демпфером, мм

Таблица 6.1

Расчётные сейсмические перемещения

Вязкость демпфера, 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

Литература

1. И.А.Биргер и Я.Г.Пановко. Справочник "Прочность. Устойчивость. Колебания". Том 3. М., Машиностроение, 1968 г.
2. Верификационный отчет АСТРА-АЭС 6.1. ЗАО НИЦ СтаДиО, 1995
3. ANSYS 11. Verification manual. 2007
4. «Семейство» программных комплексов АСТРА-НОВА'2019. Общее описание. Приложение 2. Алгоритм статического расчета трубопроводных систем. ЗАО НИЦ СтаДиО, М., 2020

Свидетельство РААСН о верификации ANSYS Mechanical



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК

Научный совет «Программные средства в строительстве и архитектуре»

СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 02/ANSYS/2009

о верификации программного средства, применяемого для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического и динамического напряженно-деформированного состояния конструкций, зданий и сооружений

Программное средство: ANSYS Mechanical – универсальный программный комплекс для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной и генетической нелинейностей на основе метода конечных элементов

Разработчик: ANSYS, Inc (США)

Заявители: ЗАО «ЕМТ Р», ЗАО НИЦ СтаДиО, ООО «ГК Техстрой», ГОУ ВПО МГСУ (Россия)

Авторы верификационного отчета: ЗАО НИЦ СтаДиО, ГОУ ВПО МГСУ (Россия)

Дата включения в реестр верифицированных программных средств: 10 июля 2009 года

Срок действия свидетельства: до 10 июля 2019 года

Перечень верифицированных возможностей программного средства ANSYS Mechanical изложен в Приложении (на 4 стр.), являющемся неотъемлемой частью настоящего Свидетельства, и в верификационном отчете (4 тома на 1200 стр.)

Вице-Президент

Академик-Секретарь

Председатель Научного Совета



В.И. Травуш

Н.И. Карпенко

В.Н. Сидоров

ПРИЛОЖЕНИЕ К СВИДЕТЕЛЬСТВУ О ВЕРИФИКАЦИИ ПС № 02/ANSYS/2009

Возможности комплекса, подтвержденные верификацией

ANSYS Mechanical - универсальный программный комплекс для решения стационарных и нестационарных задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния и оптимизации пространственных комбинированных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной (контакты с трением) и генетической (история возведения и нагружения) нелинейностей на основе метода конечных элементов.

Виды моделируемых строительных конструкций, зданий и сооружений

Произвольные пространственные комбинированные (массивно-оболочечно-плитно-стержневые из различных материалов-сред), включая:

- наземные и подземные, высотные и большепролетные, монолитные и панельные, вантовые;
- металлические (стальные, чугунные, сплавы), бетонные, железобетонные, сталежелезобетонные, каменные и кирпичные, деревянные, резиновые и резинометаллические, грунтовые;
- сложные конструктивные узлы.

Граничные (краевые) условия

Задачи теплопроводности и фильтрации (и другие задачи теории поля)

Заданные температуры (фильтрационное давление) в заданные моменты времени;

Задачи расчета НДС

Заданные перемещения и кинематические связи групп узлов.

Нагрузки и воздействия

- заданные тепловые и фильтрационные потоки;
- статические объемные, поверхностные, линейные и узловые силы и моменты, включая температурные, весовые, снеговые, средние ветровые;
- пульсационная (динамическая) составляющая ветровой нагрузки;
- сейсмические, заданные трехкомпонентными спектрами ответа и акселерограммами;
- силовые динамические, заданные временной реализацией;
- вибрационные, заданные амплитудами и частотами воздействия;
- случайные динамические, заданные спектрально (PSD).

Типы решаемых задач (виды расчетов)

- стационарные теплопроводность, фильтрация и т.п.;
- нестационарные задачи теплопроводности, фильтрации и т.п.;
- линейные статические;
- собственные частоты и формы колебаний в энергетически значимом частотном диапазоне (частичная проблема собственных значений);
- линейная устойчивость (критические нагрузки и формы потери устойчивости, частичная проблема собственных значений);
- гармонический анализ (установившиеся колебания-вибрации);
- линейно-спектральная теория сейсмостойкости (расчет на спектры ответа);
- спектральный динамический анализ (с разложением по собственным формам колебаний);

- переходные динамические процессы (прямое интегрирование уравнений движения);
- нелинейные статические и динамические (в том числе, "монтаж" и расчет на прогрессирующее обрушение);
- спектральный анализ случайных колебаний;
- оптимизация геометрической формы и структуры.

Нелинейные факторы

- геометрические нелинейности;
- физическая нелинейность (пластичность, ползучесть, вязкопластичность, гиперупругость);
- структурная нелинейность (контакты с трением);
- генетическая нелинейность (история возведения-нагрузки).

Геометрические нелинейности

- большие деформации;
- большие перемещения;
- упрочнение при нагружении (stress-stiffening).

Модели поведения материалов (включая физическую нелинейность)

- упругие изотропные, трансверсально-изотропные, ортотропные;
- пластичность металлов (теория течения с различными упрочнениями);
- ползучесть металлов;
- вязкопластичность металлов;
- образование трещин в бетоне и железобетоне;
- нелинейная модель кирпичной кладки;
- деревянные клееные;
- гиперупругие (несжимаемые) резиноподобные;
- нелинейная модель грунта (Друкера-Прагера).

Методы решения (расчета)

Метод конечных элементов в перемещениях (для задач определения НДС) с представительной библиотекой КЭ, включающий эффективные "решатели" больших размерных статических, нестационарных и динамических линейных и нелинейных задач:

- 1) результирующих систем линейных алгебраических уравнений равновесия и теории поля (прямой с учетом разреженности матриц и итерационный, реализующий метод сопряженных градиентов с предобуславливанием);
- 2) частичной проблемы собственных значений (метод итераций подпространства и варианты блочного метода Ланцоша);
- 3) неявные схемы интегрирования по времени редуцированных и исходных уравнений динамики (Ньюмарка, ННТ);
- 4) схема интегрирования по времени уравнений нестационарной теории поля (Хьюджеса);
- 5) Ньютона-Рафсона с автоматическим выбором шага и уравнивающими итерациями для физически и геометрически нелинейных задач;
- 6) "arc-length" (окаймляющих дуг) для задач с большой геометрической нелинейностью, включая учет закритического поведения;
- 7) методы штрафных функций, множителей Лагранжа и их комбинации-расширения для решения контактных задач;
- 8) прямые методы оптимизации «нулевого» и «первого» порядка;
- 9) статус «жизнь» и «смерть» КЭ для решения, в том числе, генетически нелинейных задач;

10) суперэлементные схемы произвольной иерархии (статика, переходные процессы, линейная устойчивость, модальный синтез).

Набор верифицированных конечных элементов

Из обширной библиотеки комплекса верифицированы более 50-и типов (подробнее см. в матрицах верификации – составной части верификационного отчета), включая одно-, двух- и трехмерные КЭ, а также их допустимые комбинации в одной КЭ-модели:

- 1) “элементарные” пружины, массы, демпферы и их комбинации;
- 2) стержневые (в т.ч., вантовые), работающие на растяжение и/или сжатие;
- 3) балочно-стержневые с различными гипотезами, учитывающие растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг, кручение, включая возможную деформацию сечения и эксцентриситет;
- 4) оболочечные с различными гипотезами (тонко-, средне- и толстостенные пластины и оболочки);
- 5) плоско-напряженного, плоско-деформированного и осесимметричного состояния теории упругости;
- 6) объемного НДС теории упругости;
- 7) контактные (узловые, линейные и поверхностные) с открытием-закрытием и трением;
- 8) 2-х и 3-х мерные для задач теплопроводности и фильтрации;
- 9) матричные (в т.ч., суперэлементы).

Ограничения на размерность

“Подъемные” размерности КЭ-модели (узлов, элементов) и результирующих вычислительных задач (степеней свободы, собственных значений, шагов по времени и т.п.) ограничены доступной оперативной и дисковой памятью ЭВМ, разрядностью процессора и операционной системы, располагаемым временем счета (последнее ограничение может быть снято предоставляемыми возможностями рестартов).

На использовавшейся ПЭВМ (конфигурация WIN XP 64, ОП 8 Гб, задействовано два процессора) зафиксированы следующие показатели для задач «большой» размерности:

6 300 000 степеней свободы (уравнений) для статических задач – 3957с.;

2 099 400 степеней свободы для частичной проблемы собственных значений (определено 7 низших собственных частот/форм)– 5507с.

Возможно решение задач и существенно большей размерности (десятки миллионов неизвестных, тысячи собственных частот/форм), особенно при использовании доступной многопроцессорной и кластерной технологии. Так, при использовании 30-и ядер вычислительного кластера (CPU: 8 × Intel XEON 5345 (32 × 2,33Ghz cores); Ram total: 80GB; HDD total: 640GB; System Network: Gigabit Ethernet; Rpeak=298.17 GFLOPS) статическая задача с 15 200 181 степенями свободы (уравнениями) решение методом сопряженных градиентов с преобуславливанием (PCG) потребовало от 1328 с (точность 10^{-4}) до 2733 с (точность 10^{-6}).

Результаты расчетов

Задачи теплопроводности и фильтрации

- узловые температуры (фильтрационное давление) в заданные моменты времени;
- тепловые потоки и градиенты в КЭ в заданные моменты времени.

Задачи расчета НДС

– значимые компоненты узловых перемещений (статика), скоростей и ускорений (динамика);

– реакции в граничных узлах (опорах) и давление на винклеровское основание;

– внутренние усилия (силы и моменты) в точках интегрирования КЭ и узлах;

– компоненты деформаций, главные деформации и эквивалентные деформации (Мизеса, Треска) в точках интегрирования КЭ и узлах, с разделением на упругие, температурные, пластические и ползучие составляющие;

– компоненты напряжений, главные напряжения и эквивалентные напряжения (Мизеса, Треска) в точках интегрирования КЭ и узлах;

- собственные частоты и формы колебаний (требуемое количество или в заданном частотном диапазоне);
- критические нагрузки и формы потери устойчивости;
- амплитуды перемещений, усилий и напряжений для заданных частот вибровоздействия (АЧХ);
- «статус» контакта, длина/площадь, нагрузки на контактных поверхностях, линиях и узлах;
- коэффициенты интенсивности напряжений и J-интегралы (механика разрушения);
- оптимизированные параметры конструкции (форма, сечения и др.);
- картины образования трещин в элементах бетона и железобетона;
- невязки по силам и перемещениям (нелинейные задачи).

Точность численных результатов

Зависит от класса (типа) задач, “качества” построенной КЭ-модели (сетки) и, в особенности для нелинейных задач, от выбранного метода (схемы) решения. Подробно – в матрицах верификации для решенных задач.

Для линейных задач при соблюдении известных и документированных требований к моделированию точность определения основных параметров поля, статического и динамического НДС превышает 1%. Для задач с «глубокой» нелинейностью и(или) при сложных моделях физической нелинейности расхождение с «эталонными» результатами может достигать 15-20%.

Возможность включения собственных конечных элементов, моделей поведения материалов, решателей и т.п.

Реализована с помощью прикомпилируемых пользовательских подпрограмм.

Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПК ANSYS

Встроенных в текст программы физических констант нет. Все физико-механические, геометрические, жесткостные, инерционные и диссипативные характеристики задаются явно в исходных данных.

Официальные эксперты

Начальник отдела расчетов мостов
ЗАО “Институт Гипростроймост Санкт-Петербург”
д.т.н., проф.

 Сливкер В.И.


Зав. кафедрой строительной механики
и вычислительных технологий
Пермского государственного
технического университета
д.т.н., проф.

 Кашеварова Г.Г.

Зав. кафедрой «Инженерная и компьютерная графика»
Южно-Российского государственного
технического университета
д.т.н., проф.

 Гайджуров П.П.

Председатель Научного Совета РААСН
“Программные средства в строительстве
и архитектуре”,
д.т.н., проф.

 Сидоров В.Н.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК»

107031, Москва, ул. Большая Дмитровка, 24, стр. 1

Тел.: (495) 625-79-67

(495) 629-50-54

Факс: (495) 650-25-26

E-mail: raasn@raasn.ru

25 декабря 2019.

№

ВМ-04-39/438

Настоящим Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН) извещает, что на основании решения Научного совета РААСН «Цифровые технологии в строительстве и архитектуре» (прежнее название Научный совет РААСН «Программные средства в строительстве и архитектуре») от «25» декабря 2019 года на время проведения процедуры повторной верификации в отношении универсального программного комплекса для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной и генетической нелинейностей на основе метода конечных элементов ANSYS Mechanical в системе РААСН продлен срок действия Свидетельства №02/ANSYS/2009, включая Приложение (на 4 стр.), являющееся неотъемлемой частью Свидетельства.

Вице-президент РААСН
по направлению «Строительные науки»
академик РААСН



В.И. Травуш

Исп. Т.Б. Кайтуков
тел. +7(495)625-81-53