

НОВАЯ ВЕРСИЯ  
**ЛИРА 10.8**



# Расчет зданий на сейсмические воздействия в ПК ЛИРА 10.8

**Алексей Колесников**

*Технический директор «ЛИРА софт»*

**Исаак Евзеров**

*д.т.н., научный руководитель проекта «ЛИРА 10»*

## **Виды деятельности:**



**Разработка и  
поставка ПК ЛИРА 10**



**Обучение моделированию  
и расчетам**



**Расчет зданий  
и сооружений, экспертиза**



**Техническое и инженерное  
сопровождение**

**ЛИРА софт внесено в реестр СРО Союз «СПБ»  
Свидетельство: №573/17 Выдано 28.03.2017**

**ПК ЛИРА 9.0:**

Линейно-спектральный метод

**ПК ЛИРА 9.2:**

Линейно-спектральный метод

Прямой динамический метод (линейная и геометрически нелинейная постановки)

**ПК ЛИРА 10.4:**

Линейно-спектральный метод

Прямой динамический метод (линейная и геометрически нелинейная постановки)

Нелинейный статический метод (Pushover analysis)

**ПК ЛИРА 10.8:**

Линейно-спектральный метод

Прямой динамический метод (линейная и геометрически нелинейная постановки)

Нелинейный статический метод (Pushover analysis)

Прямой динамический метод с учетом физической нелинейности

# Уравнения движения

$$Mu''(t) + Cu'(t) + Ku(t) + q(t) = 0$$



Прямое интегрирование  
уравнений движения

Аппроксимация ускорений

$$u''(t) = [u(t + \Delta t) - 2u(t) + u(t - \Delta t)] / \Delta t^2$$

Аппроксимация скоростей

$$u'(t) = [u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)] / [2\Delta t]$$

Аппроксимация перемещений

$$u(t) = [u(t + \Delta t) + u(t - \Delta t)] / 2$$

$$\left[ \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} + \frac{K}{2} \right] u(t + \Delta t) = q(t) + \frac{2M}{\Delta t^2} u(t) -$$

$$- \left[ \frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t} + \frac{K}{2} \right] u(t - \Delta t)$$



Разложение по формам  
собственных колебаний

$$K\Phi = M\Phi\Omega$$

$$u(t) = \Phi y(t)$$

$$u'(t) = \Phi y'(t)$$

$$u''(t) = \Phi y''(t)$$

$$\Phi^T M \Phi = E$$

$$\Phi^T K \Phi = \Lambda$$

$$\Phi^T C \Phi = \text{diag}[\ ]$$

$$y_i''(t) + 2\xi\omega_i y_i'(t) + \omega_i^2 y_i(t) + \Phi^T q(t) = 0$$





# Методы решения задач на сейсмические воздействия

1. Метод поперечной силы

2. Спектральный метод с использованием модального анализа

3. Прямое интегрирование уравнений движения

4. Нелинейный статический метод (Pushover Analysis)

Школы сейсмостойкого строительства стран бывшего Советского Союза не развивали первый и четвертый методы

# Спектральный метод с использованием модального анализа

Для определения частот и форм собственных колебаний решается частичная проблема собственных значений

$$K \cdot \Phi = M \cdot \Phi \cdot \Omega.$$

Формы собственных колебаний нормируются по матрице масс

$$\Phi^T \cdot M \cdot \Phi = E,$$

$$\Phi^T \cdot K \cdot \Phi = \Omega, \quad \Omega = \text{diag}[\omega_i^2].$$

Решение ищется в виде

$$u(t) = \Phi \cdot y(t).$$

Если матрица демпфирования удовлетворяет условиям ортогональности

$$\Phi^T \cdot C \cdot \Phi = \text{diag}[2 \cdot \xi_i \cdot \omega_i],$$

то система уравнений

$$M \cdot u''(t) + C \cdot u'(t) + K \cdot u(t) + F(t) = 0$$

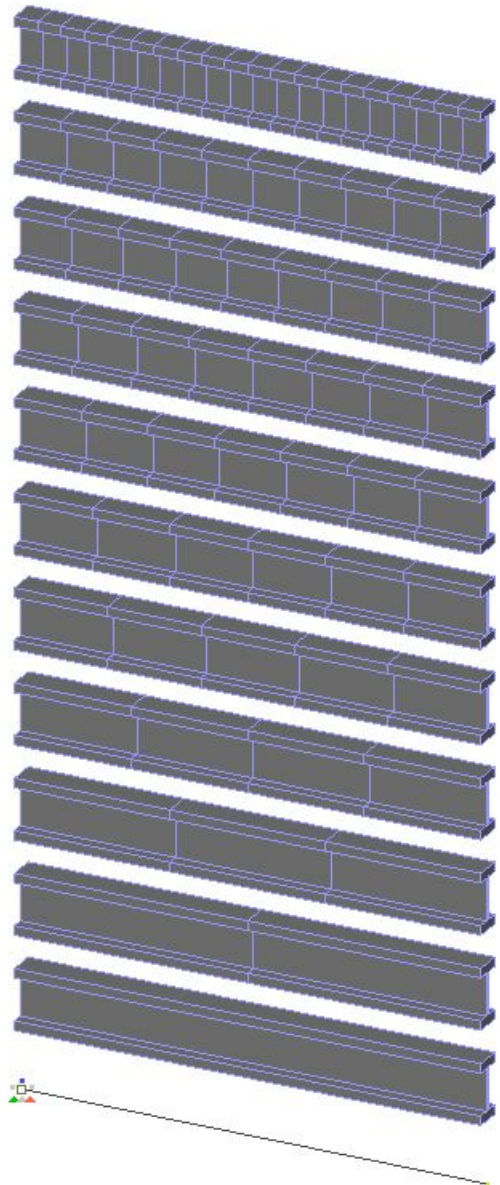
в базисе из форм собственных колебаний распадется на отдельные уравнения

$$y_i''(t) + 2 \cdot \xi_i \cdot \omega_i \cdot y_i'(t) + \omega_i^2 \cdot y_i(t) + \Phi^T \cdot F(t) = 0.$$

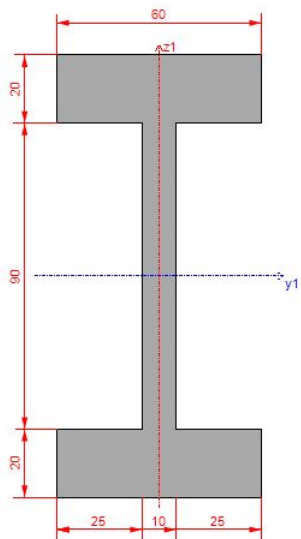
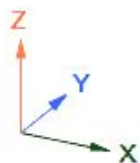
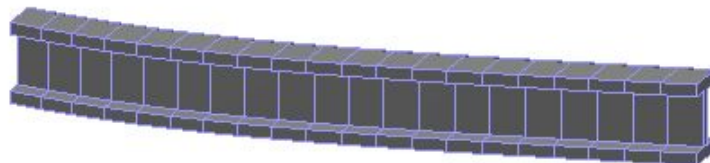




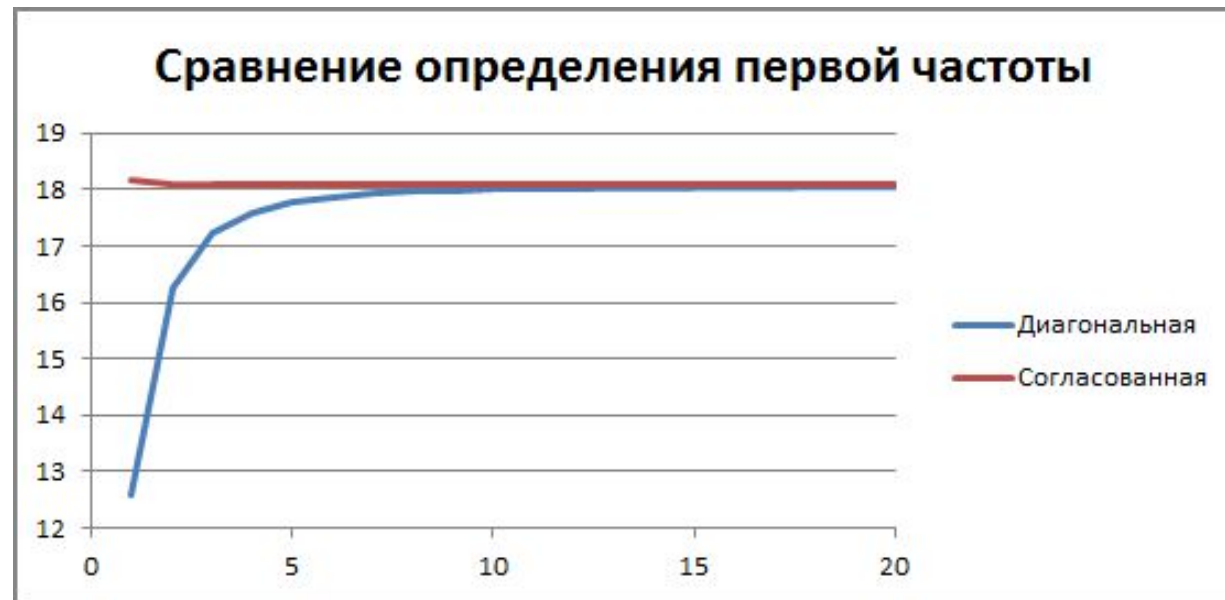
## Сравнение определения первой частоты



1.1. Форма 1  
 Массы собраны из: плотность  
 Частота: 18.078 (Рад/с)

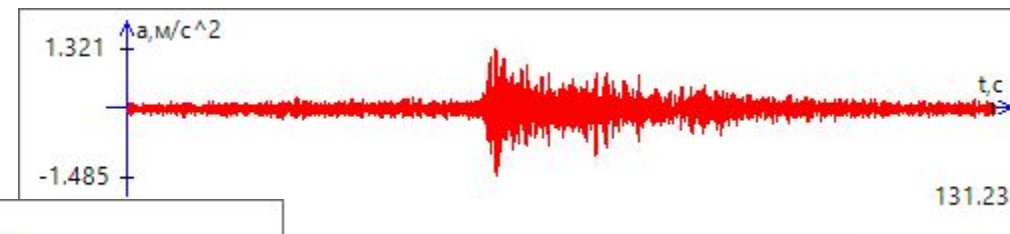


Число разбиений стержня	Частота при использовании матрица масс, Рад/с	
	диагональной	согласованной
1	12.6	18.163
2	16.236	18.086
3	17.211	18.079
4	17.583	18.078
5	17.761	18.078
6	17.859	18.078
7	17.919	18.078
8	17.958	18.078
9	17.985	18.078
10	18.004	18.078
20	18.066	18.078

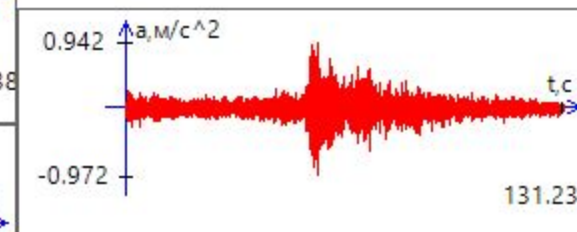
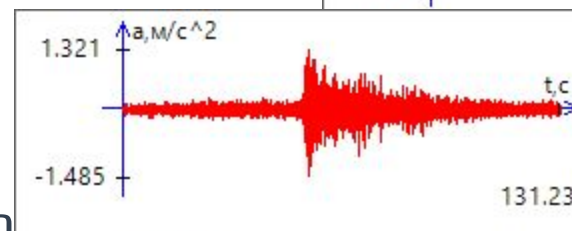


Дополнительные модули расчета на сейсмические воздействия, реализованные в ПК ЛИРА 10.8

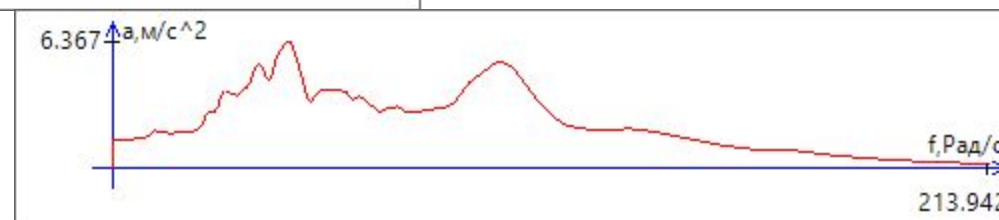
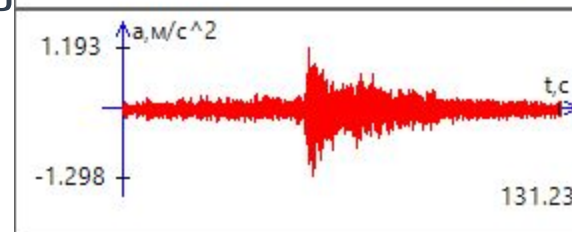
Модуль 27 – сейсмическое воздействие по однокомпонентной акселерограмме



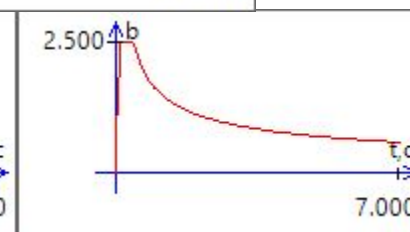
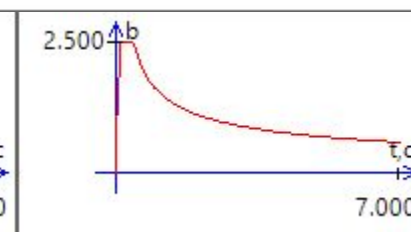
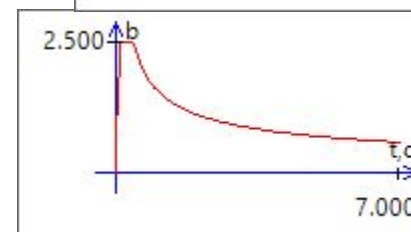
Модуль 29 – сейсмическое воздействие по трехкомпонентной акселерограмме



Модуль 41 – сейсмическое воздействие по спектру реакции одномассового осциллятора



Модуль 60 – сейсмическое воздействие по трехкомпонентным графикам спектрального коэффициента динамичности



Метод суммирования корень квадратный из суммы квадратов  
SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^m (f_i^2)}$$

Метод полной квадратичной комбинации  
CQC (Complete Quadratic Combination)

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (f_i \cdot \rho_{ij} \cdot f_j)}$$

$f_i$  — модальный фактор, соответствующий  $i$ -той форме

$\rho_{ij}$  — коэффициент корреляции между двумя формами

$m$  — количество форм колебаний

Коэффициент корреляции для CQC метода при неизменном параметре демпфирования,  $\xi = const$  определяется как

$$\rho_{ij} = \frac{8 \cdot \xi^2 \cdot (1 + r_{ij}) \cdot r_{ij}^{\frac{3}{2}}}{(1 - r_{ij}^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot r_{ij} \cdot (1 + r_{ij})^2}$$

$r_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j}$  — отношение частот  $i$ -той и  $j$ -той форм собственных колебаний



# Прямое интегрирование уравнений движения

Аппроксимация  
ускорений

$$u''(t) = \frac{u(t + \Delta t) - 2 \cdot u(t) + u(t - \Delta t)}{\Delta t^2}$$

Аппроксимация  
скоростей

$$u'(t) = \frac{u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)}{2 \cdot \Delta t}$$

Аппроксимация  
перемещений

$$u(t) = \frac{u(t + \Delta t) + u(t - \Delta t)}{2}$$

После подстановки и выражения перемещений в момент времени  $u(t + \Delta t)$ , получим

$$\left[ \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2 \cdot \Delta t} + \frac{K}{2} \right] \cdot u(t + \Delta t) = -F(t) + \frac{2 \cdot M}{\Delta t^2} u(t) - \left[ \frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2 \cdot \Delta t} + \frac{K}{2} \right] \cdot u(t - \Delta t)$$

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$$

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  находятся из решения системы двух уравнений

$$\varphi_i^T \cdot C \cdot \varphi_i = 2 \cdot \xi_i \cdot \omega_i,$$

$$\varphi_i^T \cdot C \cdot \varphi_i = \alpha \cdot \varphi_i^T \cdot M \cdot \varphi_i + \beta \cdot \varphi_i^T \cdot K \cdot \varphi_i,$$

$$\varphi_i^T \cdot M \cdot \varphi_i = 1, \quad \varphi_i^T \cdot K \cdot \varphi_i = \omega_i^2$$

$$\begin{cases} \alpha + \beta \cdot \omega_1^2 = 2 \cdot \xi_1 \cdot \omega_1, \\ \alpha + \beta \cdot \omega_2^2 = 2 \cdot \xi_2 \cdot \omega_2. \end{cases}$$

Полагая, что параметры затухания одинаковы

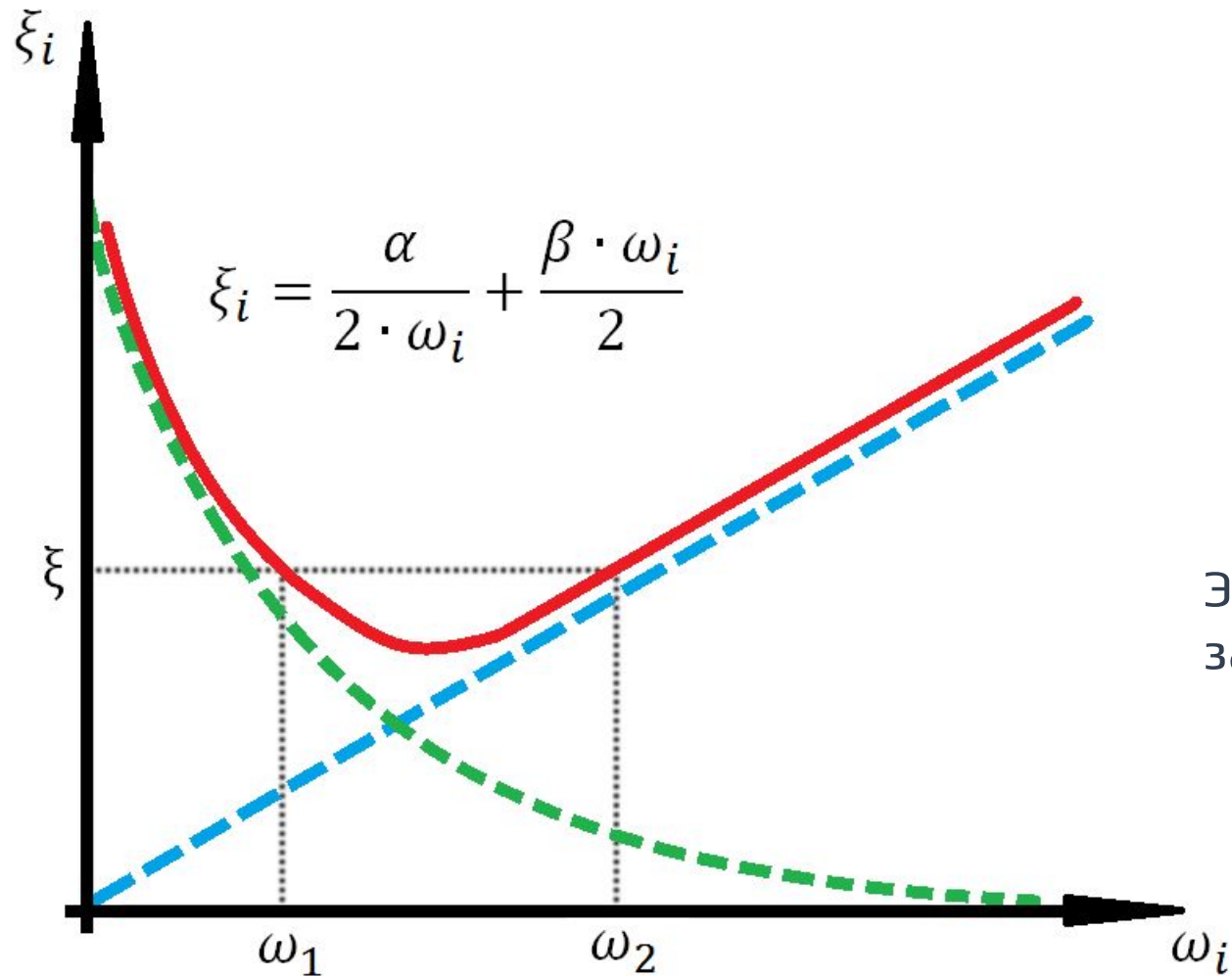
$$\xi_1 = \xi_2 = \xi.$$

Получим следующие выражения для коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_1 \cdot \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \text{ — характеризует инерционное демпфирование}$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_1 + \omega_2} \text{ — характеризует конструкционное демпфирование}$$

Для описания затухания  
используются следующие величины:



Эти четыре параметра связаны следующей  
зависимостью



Расчет на сейсмограмму землетрясения

$$Mz''(t) + Cz'(t) + Kz(t) = 0$$

В результате получаем абсолютные перемещения конструкции

$$z(t) = u(t) + \gamma s(t)$$

Расчет на сейсмограмму землетрясения позволяет учесть скорость распространения сейсмической волны. Эффект от скорости распространения ожидать следует в протяженных конструкциях



Расчет на акселерограмму землетрясения

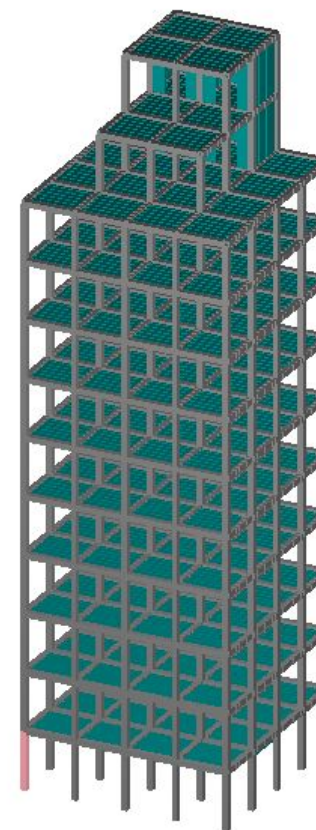
$$a(t) = s''(t)$$

$$Mu''(t) + Cu'(t) + Ku(t) + M\gamma a(t) = 0$$

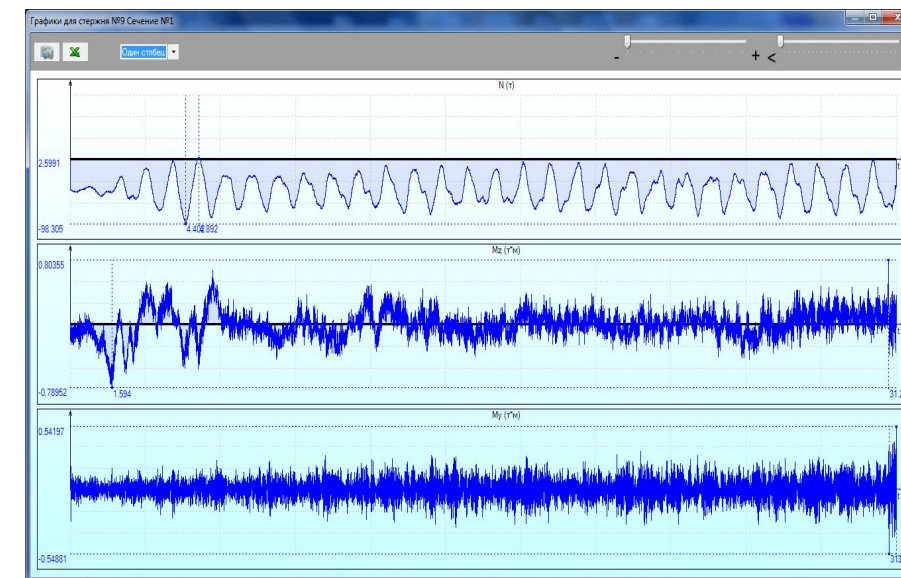
В результате получаем относительные перемещения конструкции



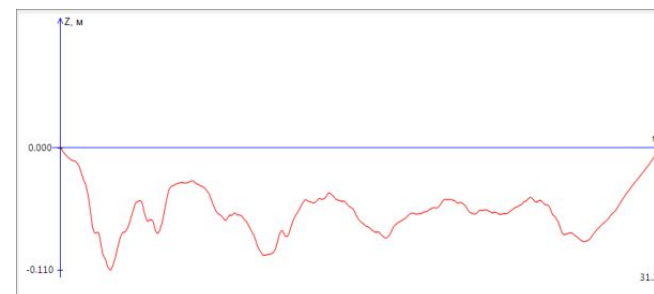
## Анимация стадий монтажа



Сейсмограмма



После окончания процесса возведения здания выполняется расчет по динамике во времени, например, на сейсмограмму землетрясения.



Нелинейные методы:

- статический
- динамический



Pushover\_410.fep\* 1.1. Стадия нелинейного нагружения

Вид и выбор Редакторы и конструирование Добавить Правка Назначение Расчет Анализ и документирование

Редактор сечений/ жесткостей Редактор материалов Редактор загрузжений Редактор конструирования Редактор грунта Новый вид Назначить сечение, материал, конструирование Конструктивные элементы Раскрепление для прогибов Группы элементов Продавливание Пов. несущей способности

Файл Вид Выбор Расчет Редакторы Конструирование Схема Назначение Правка Анализ Документирование Сервис Контроль Справка

Головный вид Загрузки

Добавить загрузжение Добавить сочетание PCS/PCN (Не использовать) Импорт загрузжений

Сейсмика с разложением по собственным формам колебаний для задач определения спектра несущей способности: Сейсмика с разложением по собственным формам колебаний ( Сейсмика с разложением по собственным

Имя Сейсмика с разложением по собственным формам колебаний

Описание

Параметры частичной проблемы собственных значений

Количество форм	10	Матрица масс	Согласованная
-----------------	----	--------------	---------------

Выберите расчетный модуль

- (44) Сейсмическое воздействие по EN 1998-1:2004 (Eurocode 8)
- (27) Сейсмическое воздействие по однокомпонентной акселерограмме
- (36) Сейсмическое воздействие по ДБН В.1.1-12:2014 (Украина)
- (44) Сейсмическое воздействие по EN 1998-1:2004 (Eurocode 8)
- (55) Сейсмическое воздействие по СТО НИУ МГСУ 2015 (Российская Федерация)

Расчет

по спектру реакции

Сдвигающая сила в основании (распределение горизонтальных сейсмических сил)

равномерное распределение

линейно возрастающее по высоте

по собственной форме колебаний № 1

Поправочный коэффициент к инерционным силам

Тип расчета Упругий

Тип спектра I тип

Тип грунта A

Расчетное ускорение грунта,  $a_g$  (п.3.2.1(3)) 1 м/с<sup>2</sup>

Кoeffициент демпфирования,  $\eta$  (ф.3.6) 1

Уровень фундамента (жесткого основания) 0

Нижний показатель границы для горизонтального расчетного спектра,  $\beta$  (п.3.2.2.5(4)) 0.2

Горизонтальный коэффициент поведения,  $q$  1

Количество этажей для определения поправочного коэффициента  $\lambda$  (п.4.3.3.2.2) 1

Исходные данные X: Y: Z: 20/-/ 20/-/ 20/-/



Pushover\_410.fep\* 1.1. Стадия нелинейного нагружения

Вид и выбор Редакторы и конструирование Добавить Правка Назначение Расчет Анализ и документирование

Редактор сечений/ жесткостей Редактор материалов Редактор нагружений Редактор конструирования Редактор грунта Новый вид Назначить сечение, материал, конструирование Конструктивные элементы для прогибов Раскрепление для прогибов Группы элементов Продавливание Пов. несущей способности

Файл Вид Выбор Расчет Редакторы Конструирование Схема Назначение Правка Анализ Документирование Сервис Контроль Справка

Головный вид Загружения

Добавить загрузку Добавить сочетание PCS/PCN (Не использовать) Импорт загружений

Построение спектра несущей способности : Спектр несущей способности ( Спектр несущей способности )

Имя Спектр несущей способности

Описание

Библиотека загрузжений

- 1. История нелинейного нагружения
  - 1. Стадия нелинейного нагружения
  - 2. Стадия нелинейного нагружения
  - 2. Сейсмика с разложением по собственным формам
  - 3. Спектр несущей способности

Предшествующая история Сейсмическое нагружение

1. История нелинейного нагружения 2. Сейсмика с разложением по собственным формам колебаний

Номер учитываемой формы собственных колебаний (0-для формы с максимальным модальным вкладом, 1-для сдвигающей силы в основании)

3

Коэффициент к инерционным силам по выбранной форме собственных колебаний

1

Параметры выполнения расчета

Обнулить перемещения Минимальное количество итераций для физически нелинейных итерационных элементов

1000

Стартовый шаг Допускаемая погрешность в выборе шага Шаг сохранения результатов

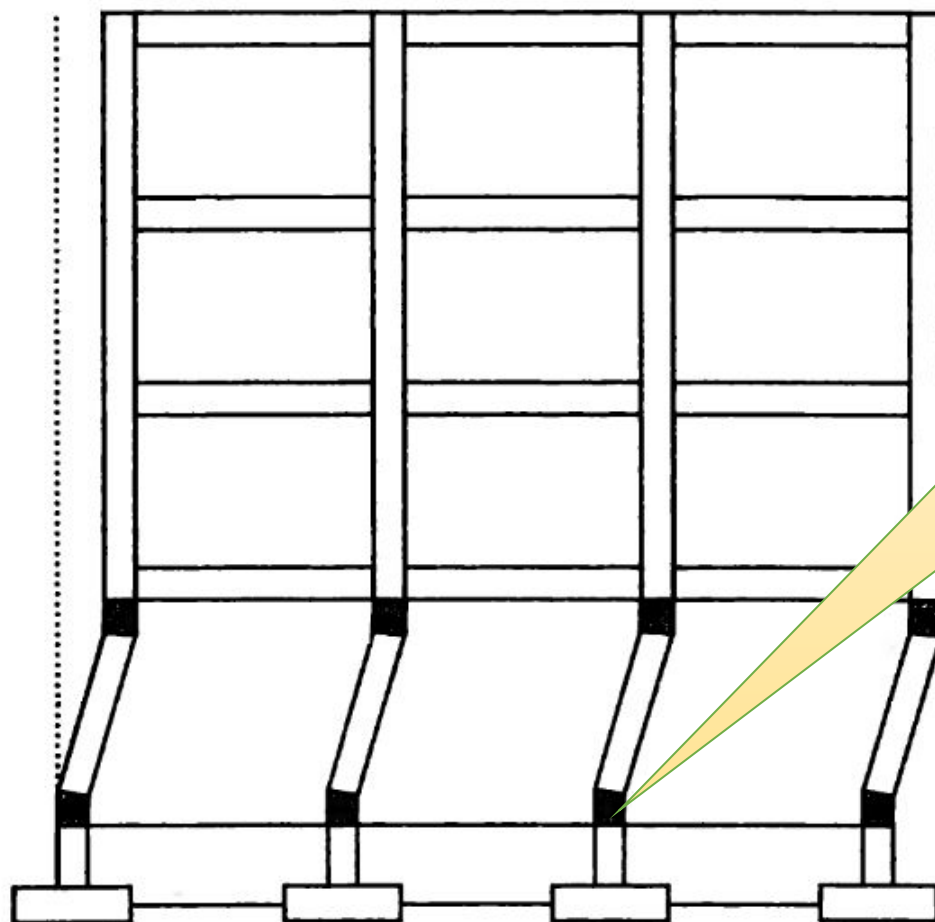
1E-07 1E-07 0.1

Параметры прекращения расчета

Номер контролируемого узла	Предельное значение суммарного перемещения	Предельный коэффициент к нагружению
8	6000 мм	10

Исходные данные X: Y: Z: 20/-/ 20/-/ Z

## Условие общей и местной пластичности



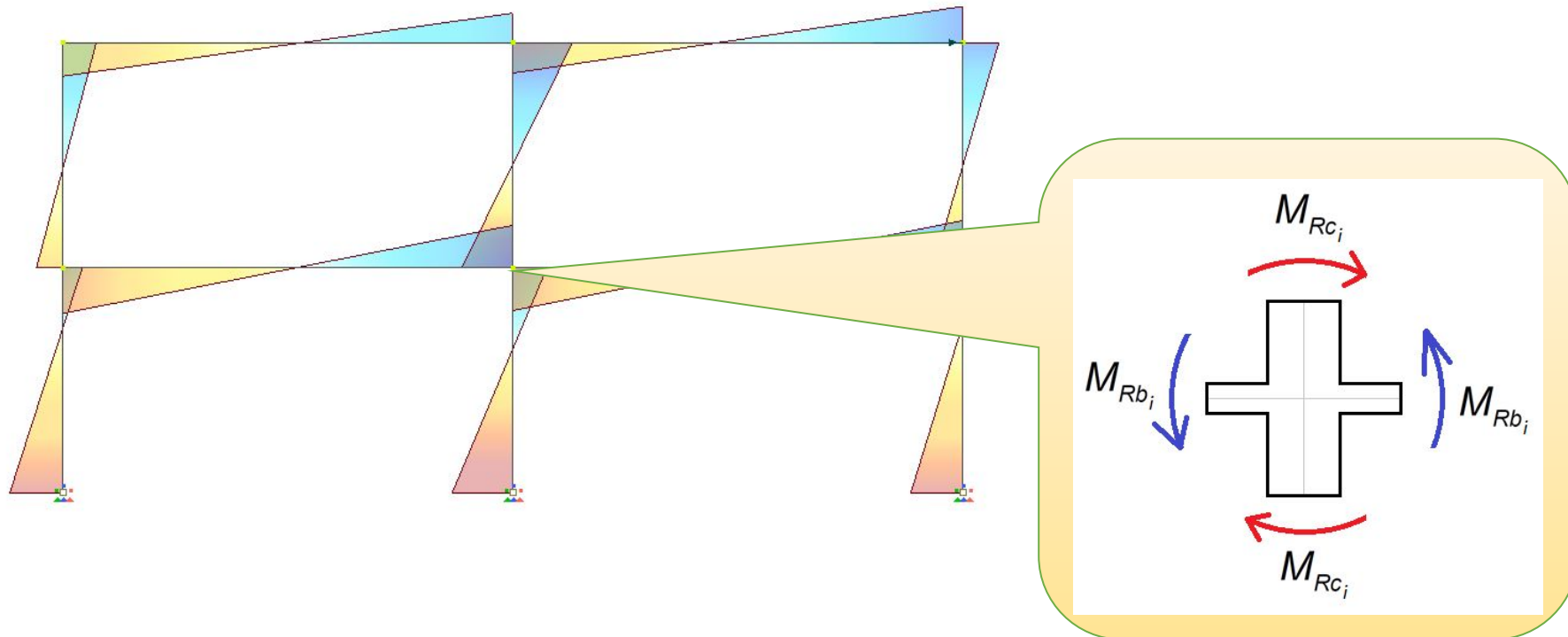
Для многоэтажных зданий требуется исключить формирование пластического механизма этажа

Требование главы 4 EN 1998-1:2004

## Условие общей и местной пластичности

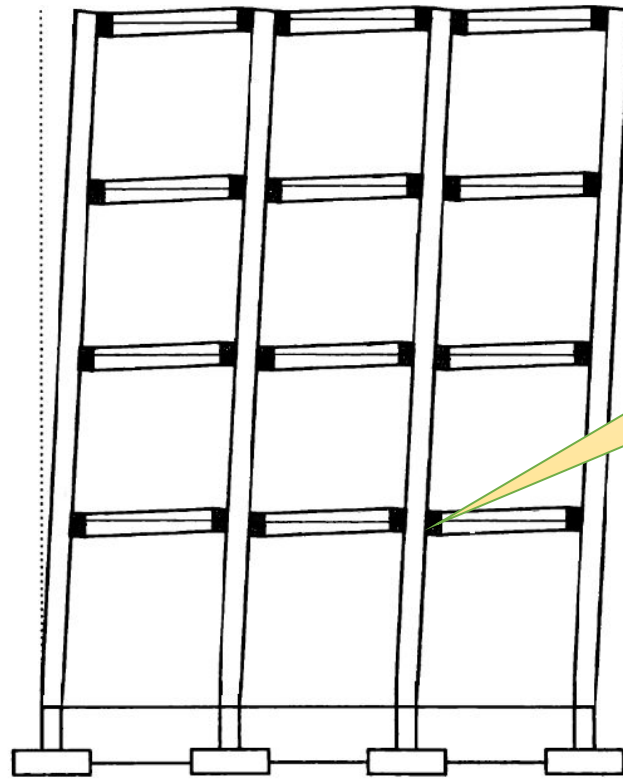
4.4.2.3(4) В каркасных зданиях с двумя или более этажами, во всех соединениях первичных (несущих) или вторичных (не несущих) сейсмических балок с первичными сейсмическими колоннами должно выполняться следующее условие (4.29):

$$\sum M_{Rc} \geq 1.3 \sum M_{Rb}$$



Это условие должно выполняться и для другого направления приложения нагрузки

## Условие общей и местной пластичности



Возникновение  
пластических  
шарниров  
в балках

Проектирование как продольной, так и поперечной арматуры в колоннах зависит от фактической несущей способности балок. Таким образом, необходимо обязательно рассчитать и запроектировать балки прежде, чем приступить к расчету и проектированию колонн



Новые изгибаемые физически нелинейные конечные элементы, основанные на теории упруго-пластичности

Стержневые

КЭ 50 1	КЭ 50 2	КЭ 50 4	КЭ 50 5	КЭ 51 0
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Пластинчатые

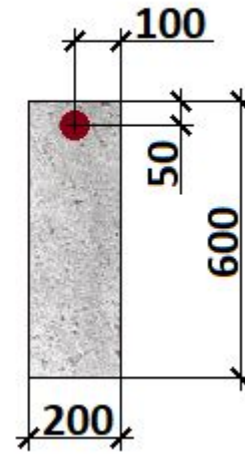
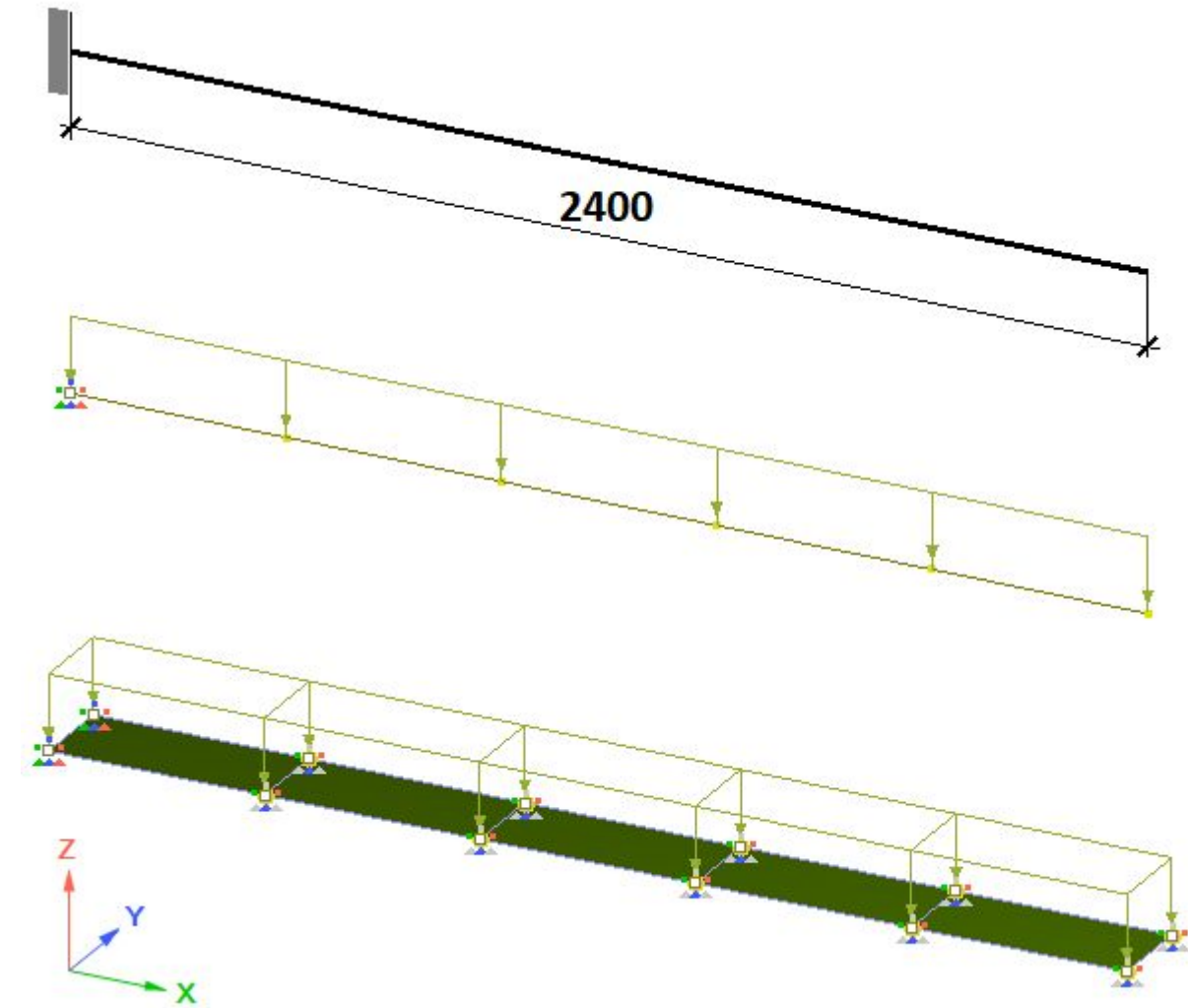
Тонкой оболочки

КЭ 54 1	КЭ 54 2	КЭ 54 3	КЭ 54 4	КЭ 55 0
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Толстой оболочки

КЭ 54 5	КЭ 54 6	КЭ 54 7	КЭ 54 8	КЭ 54 9
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

В ПК ЛИРА реализованы физически нелинейные конечные элементы изгибаемых стержней и пластин, основанные на нелинейной теории упругости. Эти элементы успешно применяются для статических расчетов, но не применимы для динамических. Затем были разработаны двумерные и трехмерные физически нелинейные конечные элементы, основанные на теории упруго-пластичности. Эти элементы применяются и для статических, и для динамических расчетов, но не решают задач изгиба. Предлагаются новые физически нелинейные конечные элементы изгибаемых стержней и пластин, основанные на теории упруго-пластичности. Эти новые элементы могут применяться как для статических, так и для динамических расчетов, в том числе и для решения задач сеймики. В статической задаче применяется шагово-итерационный метод, в динамической - метод конечных разностей.



Рассматривается консольная балка, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью  $q = 12 \frac{tf}{m}$ , а затем разгружена равномерно распределенной нагрузкой той же интенсивности.

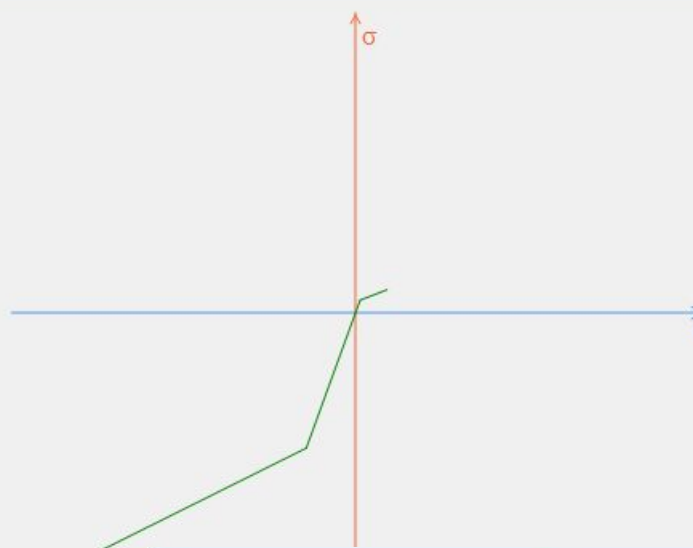
Моделирование выполнялось как стержневыми, так и оболочечными КЭ.

Использовались стержневой (FE 210) и оболочечный (FE 244) физически нелинейные КЭ и стержневой (FE 510) и оболочечный (FE 544) упруго-пластичные КЭ.

Расчетная схема состоит из 5 КЭ. Поперечное сечение консольной балки армировано одним стержнем

Поведение бетона: 13 - трехлинейная зависимость

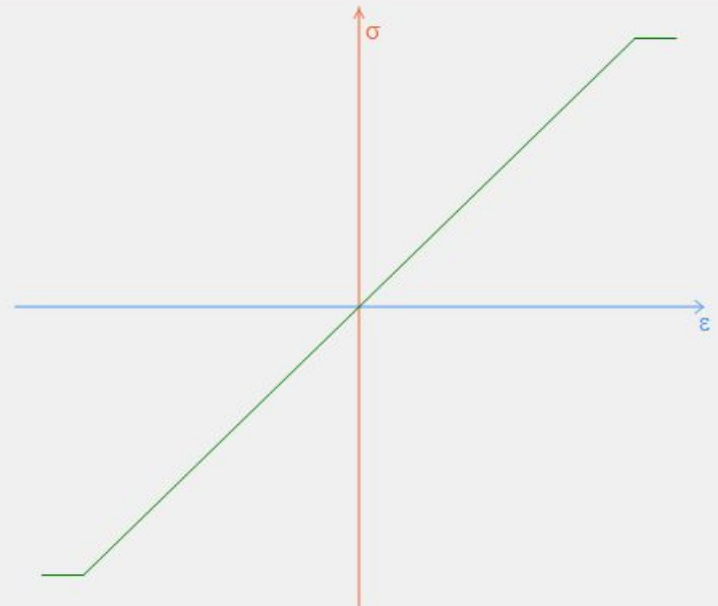
Свойства материала		
Модуль упругости, тс/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона	Коэффициент температурного расширения, 1/С
E 3.06E+06	ν 0	α 1E-05
Характеристики на растяжение		
Предел упругости, тс/м <sup>2</sup>	Предел прочности, тс/м <sup>2</sup>	Предел относительной деформации
σ <sub>0+</sub> 90	σ <sub>+</sub> 163	ε <sub>+</sub> 0.0002
Характеристики на сжатие		
Предел упругости, тс/м <sup>2</sup>	Предел прочности, тс/м <sup>2</sup>	Предел относительной деформации
σ <sub>0-</sub> -950	σ <sub>-</sub> -1890	ε <sub>-</sub> -0.002



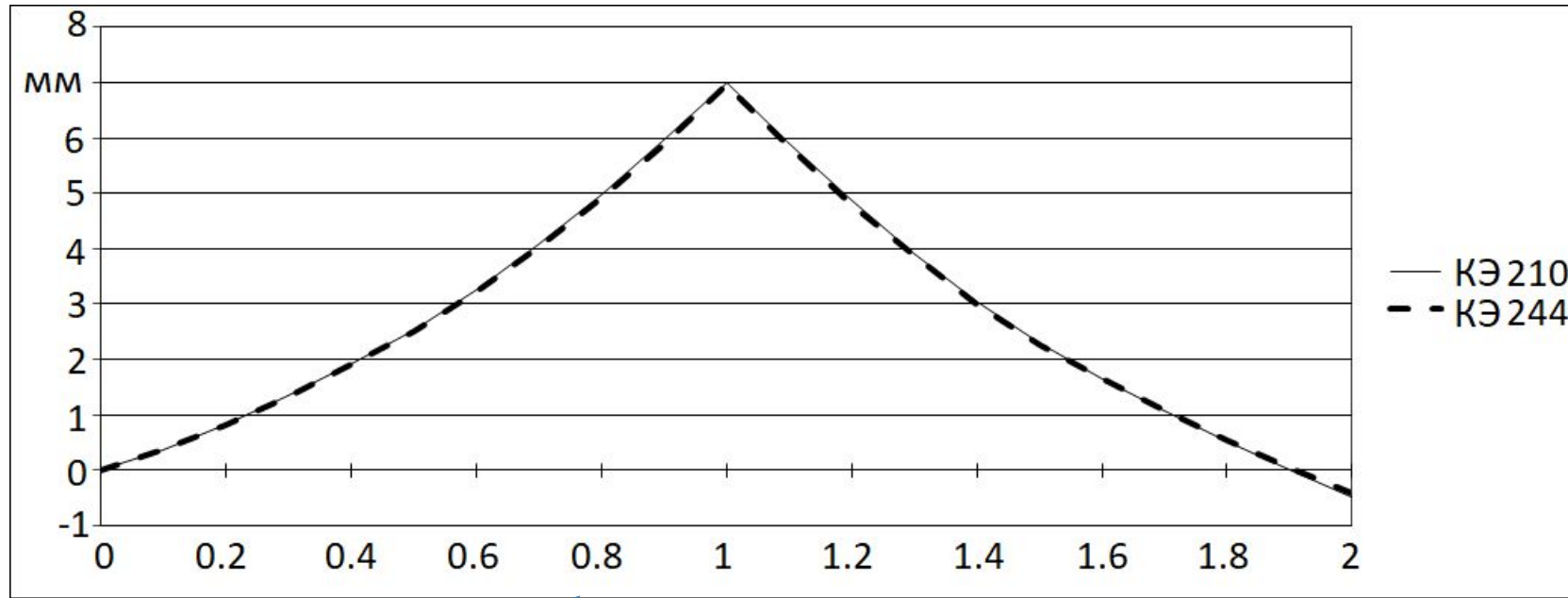
Диаграммы работы, описывающие закон деформирования для бетона и арматуры

Поведение арматуры: 13 - трехлинейная зависимость

Свойства материала		
Модуль упругости, тс/м <sup>2</sup>		
E 2.1E+07		
Характеристики на растяжение		
Предел упругости, тс/м <sup>2</sup>	Предел прочности, тс/м <sup>2</sup>	Предел относительной деформации
σ <sub>0+</sub> 36500	σ <sub>+</sub> 36500	ε <sub>+</sub> 0.002
Характеристики на сжатие		
Предел упругости, тс/м <sup>2</sup>	Предел прочности, тс/м <sup>2</sup>	Предел относительной деформации
σ <sub>0-</sub> -36500	σ <sub>-</sub> -36500	ε <sub>-</sub> -0.002

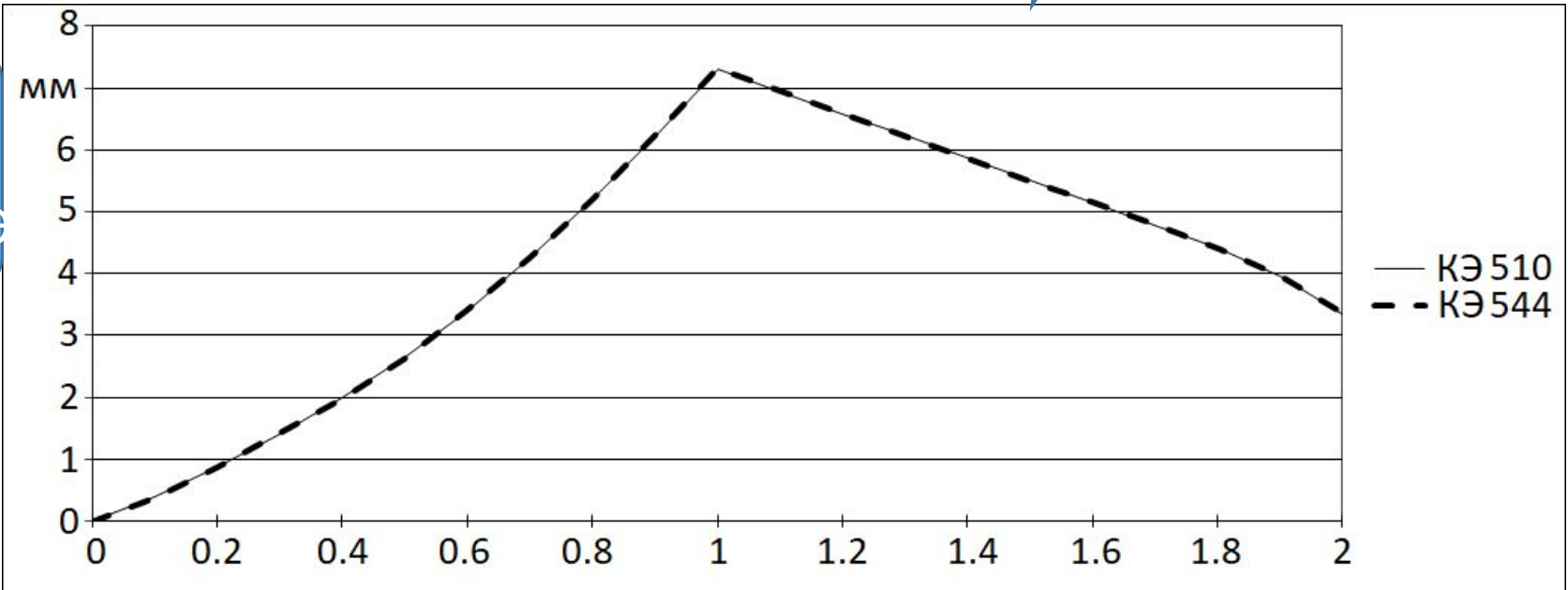


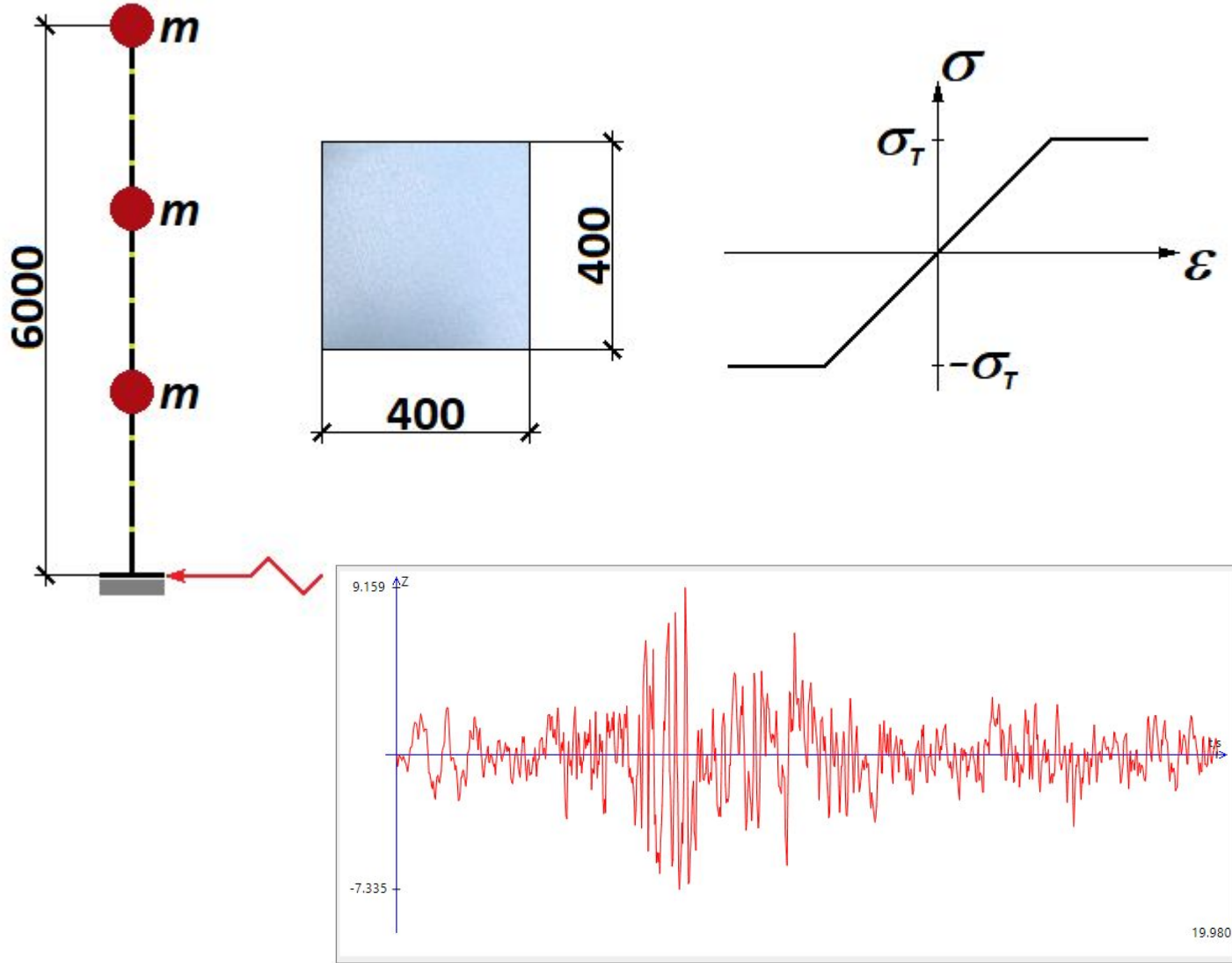




Перемещения свободного края при моделировании упруго-пластичными КЭ

Перемещения свободного края при моделировании физически нелинейными КЭ





Рассматривалась консольная балка квадратного сечения при сейсмическом воздействии, заданном в виде акселерограммы землетрясения.

Демпфирование было представлено матрицей демпфирования в форме Рэлея

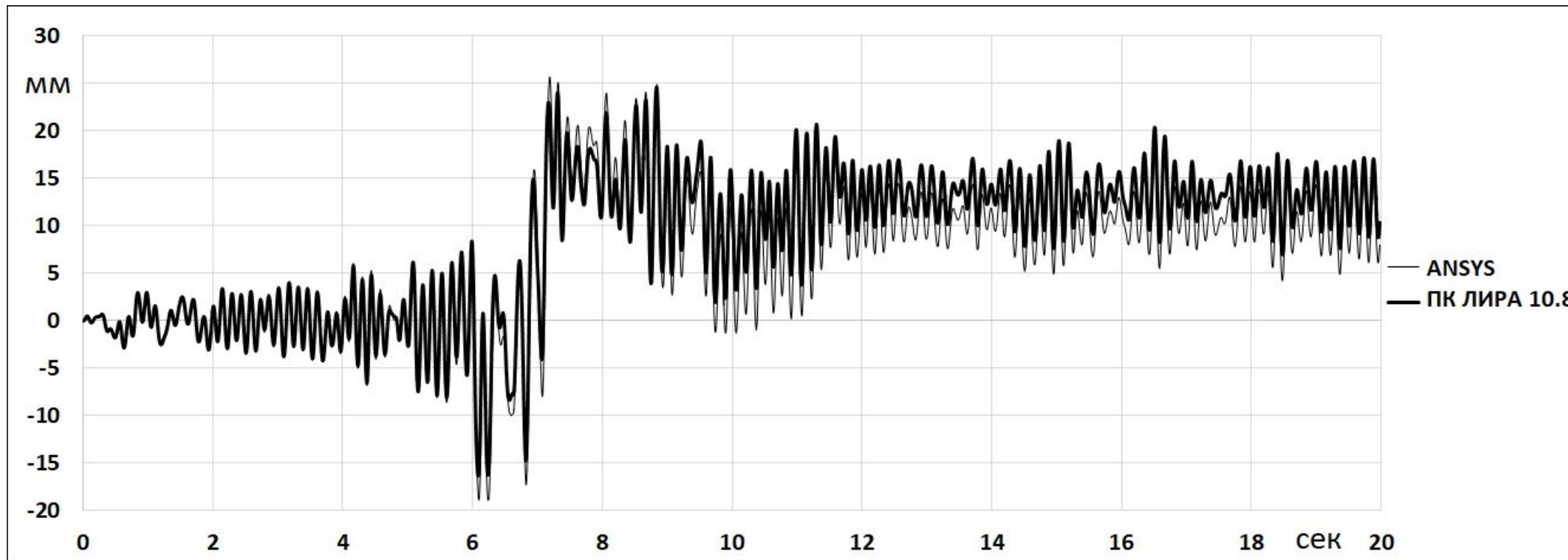
$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K,$$

со следующими значениями параметров  $\alpha = 0.0 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\beta = 0.0023016 \text{ сек}$ .

Масса была сосредоточена в трех узлах  $m = 1.0 \text{ т}$ . Закон деформирования материала также представлен на рисунке.

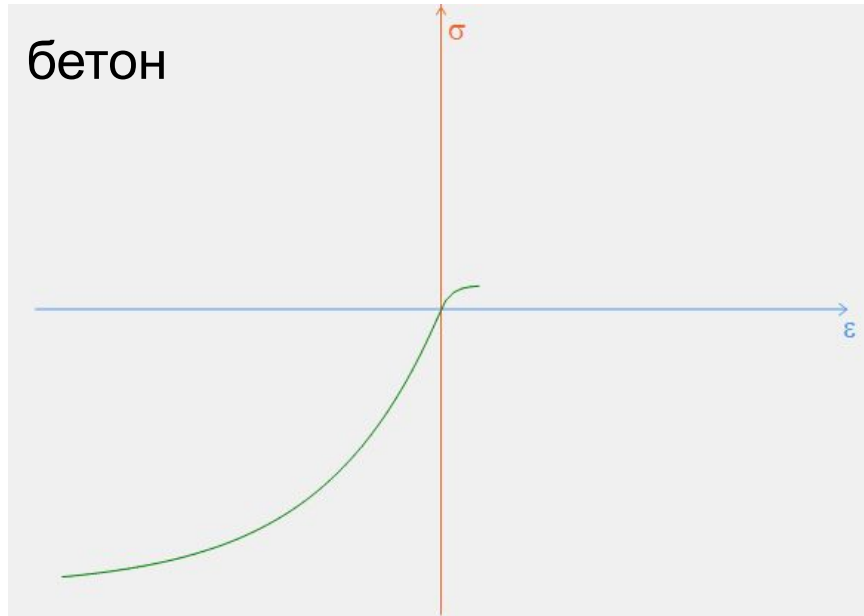
Начальный модуль упругости равен

Вначале была решена линейная динамическая задача, результаты которой показали полное совпадение между ПК ЛИРА 10.8 и ANSYS.



Сравнение результатов нелинейной задачи с результатами, полученными в пакете конечно-элементного анализа ANSYS

# Реализация физ. нелинейности при использовании модуля Динамика+



11 - экспоненциально зависимый материал

11 - экспоненциально зависимый материал

13 - трехлинейная зависимость

15 - экспоненциально зависимый бетон

14 - кусочно-линейное описание

18 - бетон по теории Гениева

Учет пластических шарниров

СНиП 2.03.01-84\*

СНиП 2.03.01-84\*

Еврокод 2

СП 52-101-2003

ДСТУ Б В.2.6-156:2010

Теории прочности для КЭ физически нелинейных оболочек

Наибольших главных напряжений

Наибольших главных напряжений

Наибольших главных деформаций

Наибольших касательных напряжений

Энергетическая Губера-Хенки-Мизеса

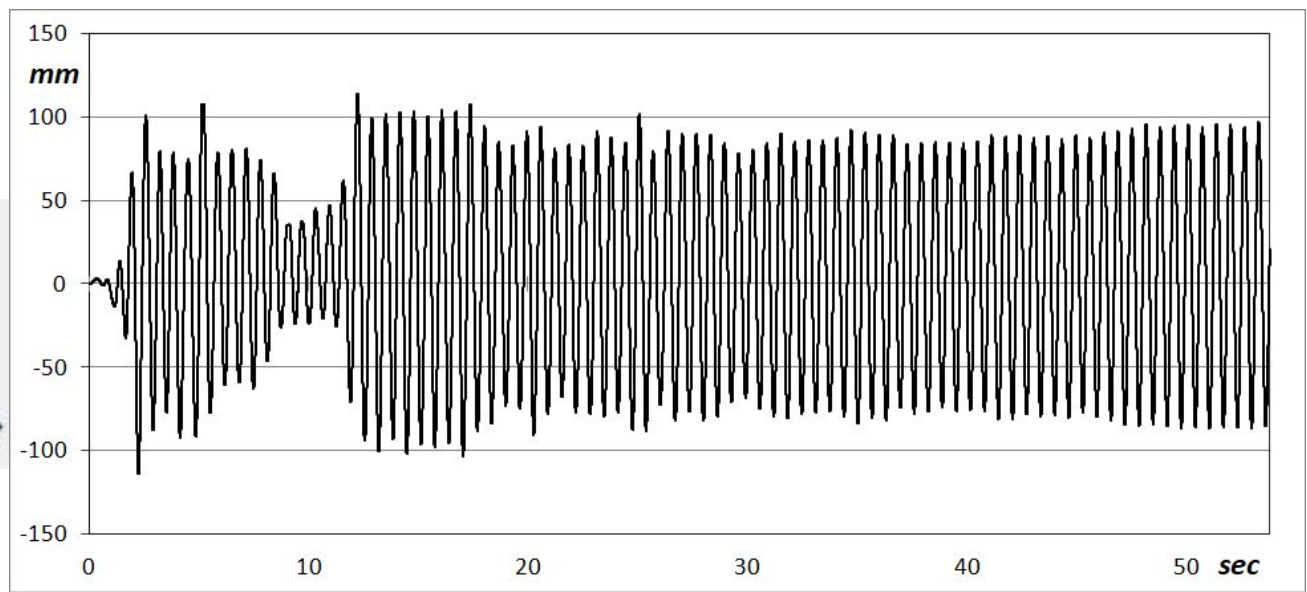
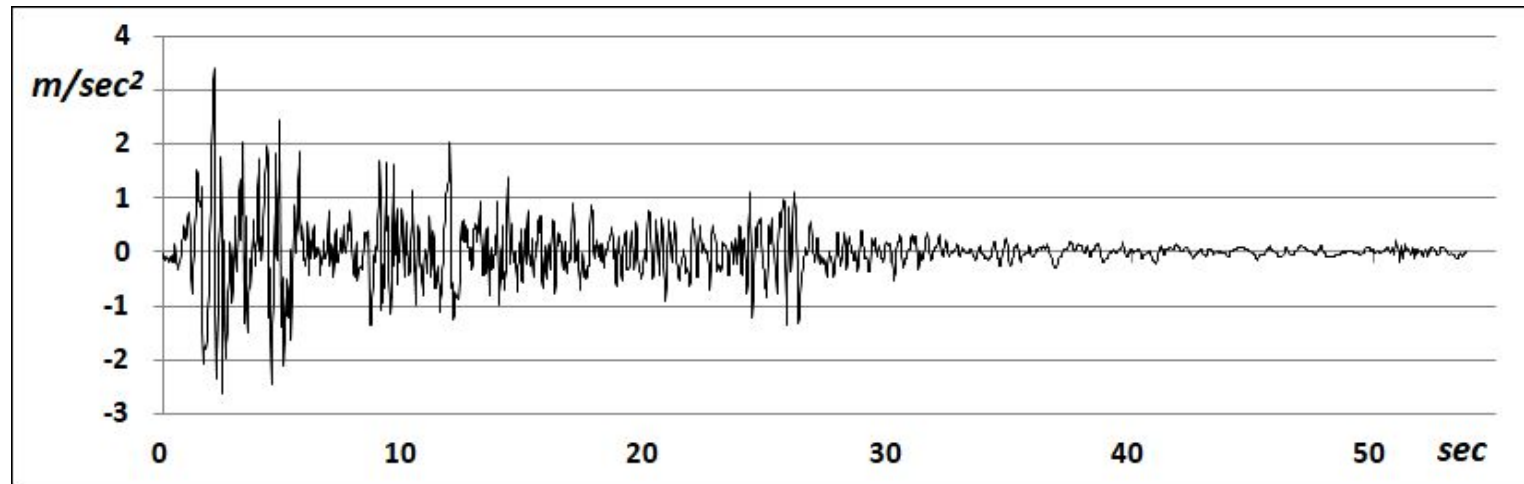
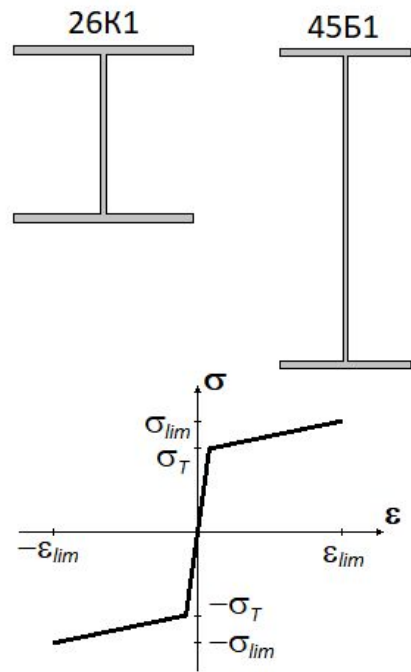
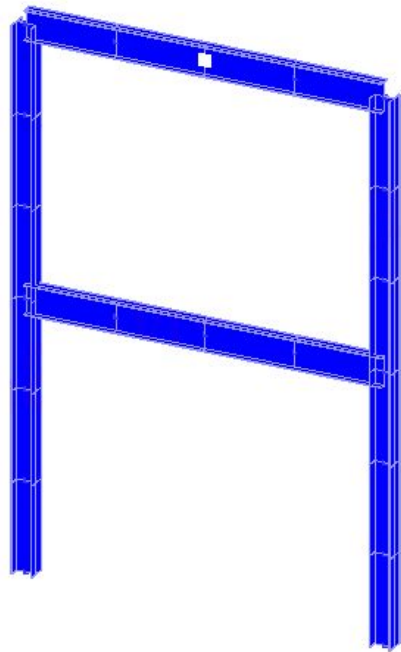
Теория Мора

Теория Друккера-Прагера

Теория Писаренко-Лебедева

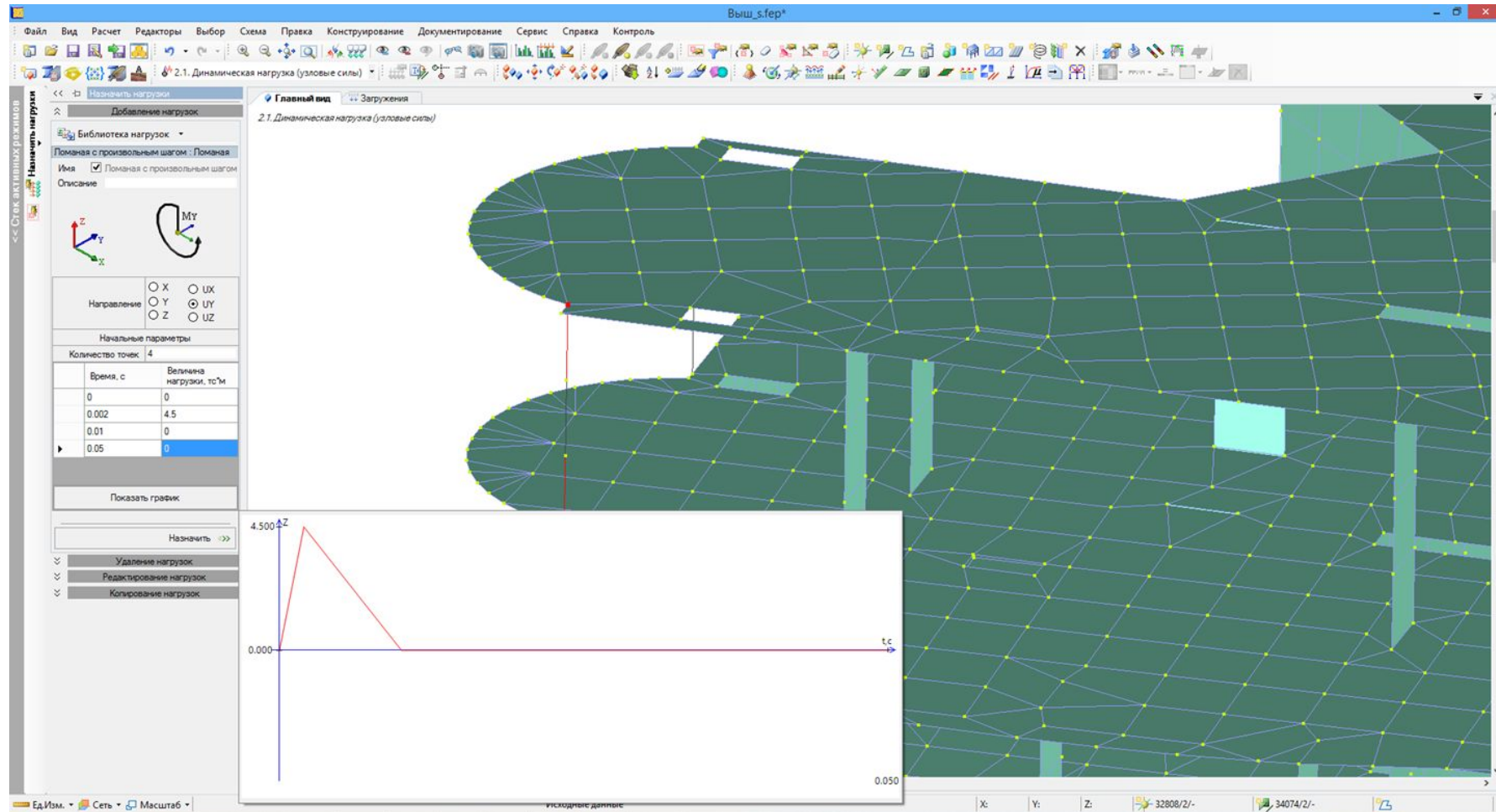
Теория Гениева (для железобетона)





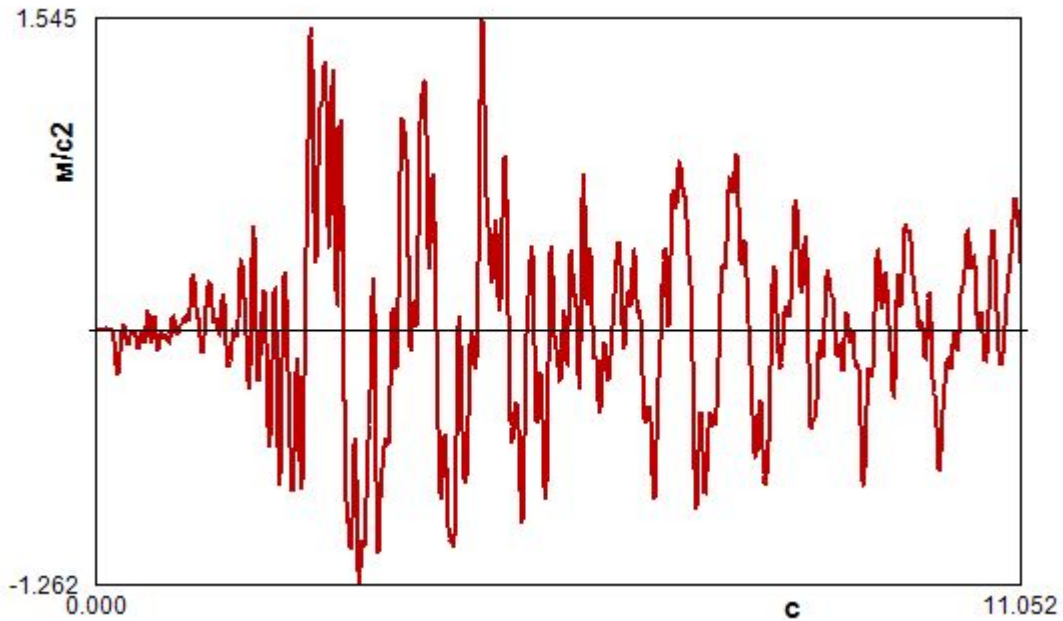
- В задаче будут присутствовать нелинейные элементы
- В задаче будет использоваться система « МОНТАЖ »
- В задаче будет использоваться система « ДИНАМИКА + »

# Система Динамика+

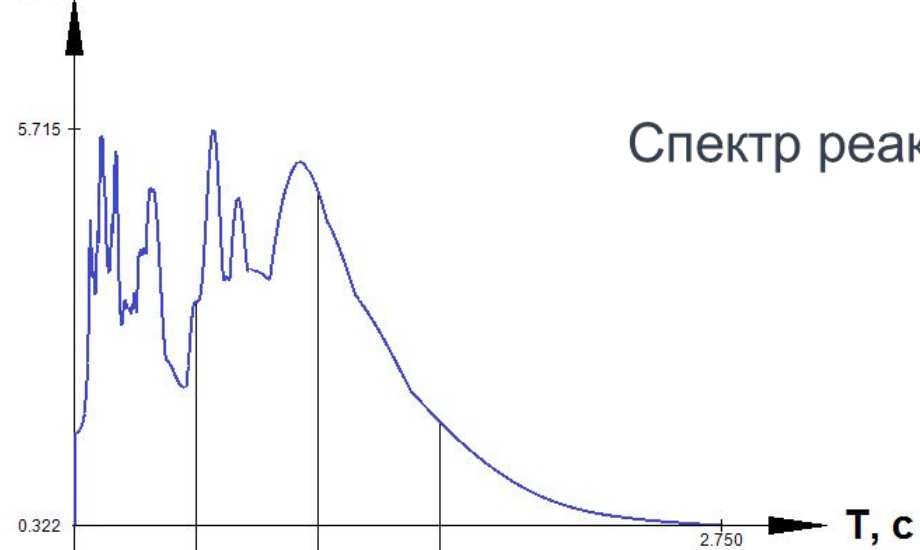


Возможность задавать переменные по времени моменты

Исходная

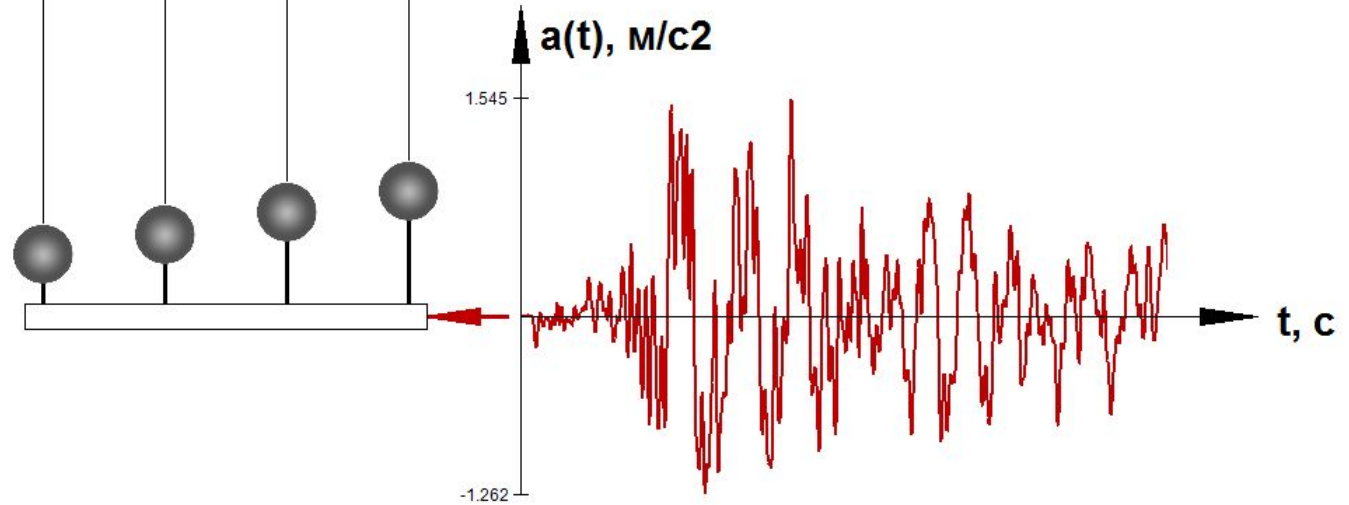


$A(T), m/c^2$



Спектр реакции ( $\xi = 0.03$ )

$a(t), m/c^2$



Переход от акселерограммы  
к спектру реакции



### Выбор акселерограмм

Список акселерограмм:

- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'

Добавить текущую

Изменить масштабный множитель

Удалить текущую акселерограмму

Прочитать акселерограмму из файла...

1.690  $\text{a, м/с}^2$

-1.268

### Построение усредненного спектра реакции по пакету акселерограмм

Выбор акселерограмм: **Спектр реакции**

Спектр реакции ускорения одномассового осциллятора

Масштабный множитель к спектру реакции: 1

4.026  $\text{a, м/с}^2$

f, Rad/c

213.660

Комментарий: Усредненный график спектра реакции ускорения по акселерограммам 000155XA

Сохранить в файл

Передать в 41 модуль динамики

### Параметры построения

Спектр реакции по:

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

<input type="radio"/> 0.004774	<input type="radio"/> 0.019095
<input type="radio"/> 0.039757	<input type="radio"/> 0.049278
<input type="radio"/> 0.069857	<input type="radio"/> 0.099767
<input type="radio"/> 0.196620	<input checked="" type="radio"/> 0.05

Управляющие параметры

Значение предельной частоты: 213.63 Rad/c

Дробление стандартного шага: 20

Построить



Построение усредненного спектрального коэффициента динамичности по пакету акселерограмм

**Выбор акселерограмм**

Список акселерограмм:

- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'

Добавить текущую

Изменить масштабный множитель

Удалить текущую акселерограмму

Прочитать акселерограмму из файла...

**Параметры построения**

Коэф. динамичности по:

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания:

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

0.004774 0.019095  
 0.039757 0.049278  
 0.069857 0.099767  
 0.196620 0.05

Построить

**Построение усредненного спектрального коэффициента динамичности по пакету акселерограмм**

Выбор акселерограмм: Коэффициент динамичности

Спектральный коэффициент динамичности по ускорениям

Масштабный множитель к коэффициенту динамичности: 1

	Период, с	Коэф.
▶ 1	0.029407440082...	0.0892496342913462
2	0.029537734455...	0.0894452840635668
3	0.029669188547...	0.089644016139291
4	0.029801817910...	0.0898369929808975
5	0.029935638377...	0.0900254118199865
6	0.030070666065...	0.0902304690365375
7	0.030206917384...	0.0904332907647535
8	0.030344409042...	0.090637142917538
9	0.030483158055...	0.0908417015719213
10	0.030623181748...	0.0910607568811047
11	0.030764497769...	0.0912754645420327

Комментарий

Усредненный график спектрального коэффициента динамичности по ускорениям для

Сохранить в файл

Передать в 60 модуль динамики

**Параметры построения**

Коэф. динамичности по:

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания:

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

0.004774 0.019095  
 0.039757 0.049278  
 0.069857 0.099767  
 0.196620 0.05

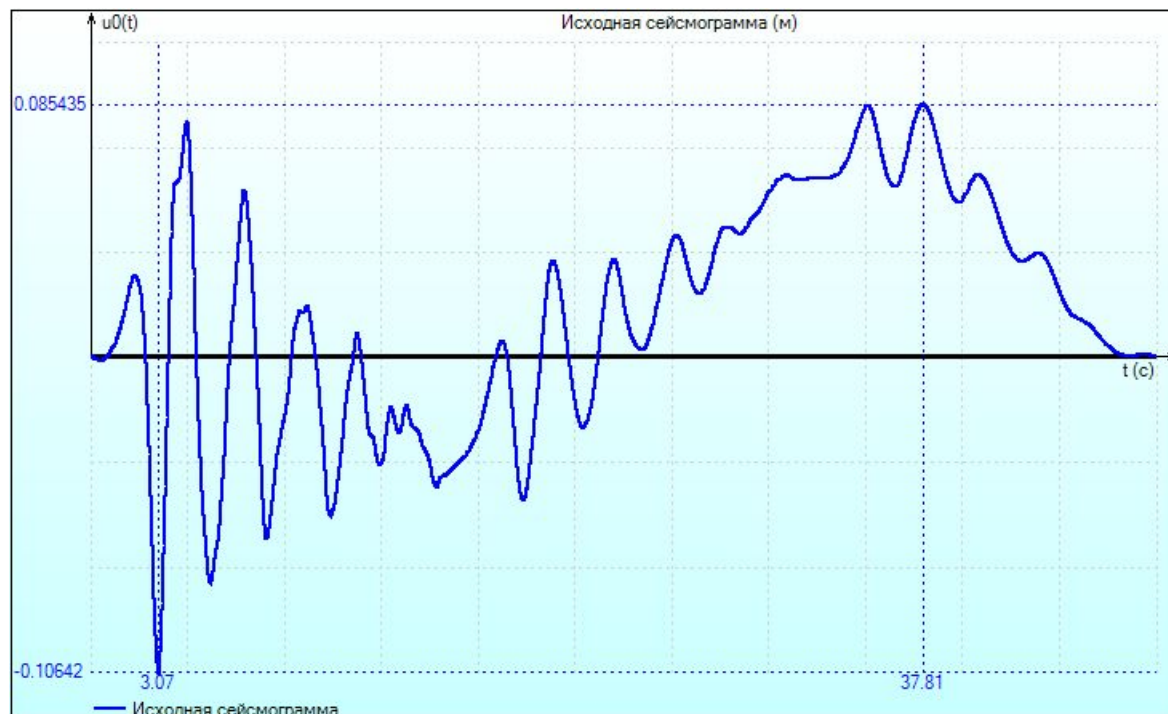
Управляющие параметры

Значение предельной частоты: 213.63 Рад/с

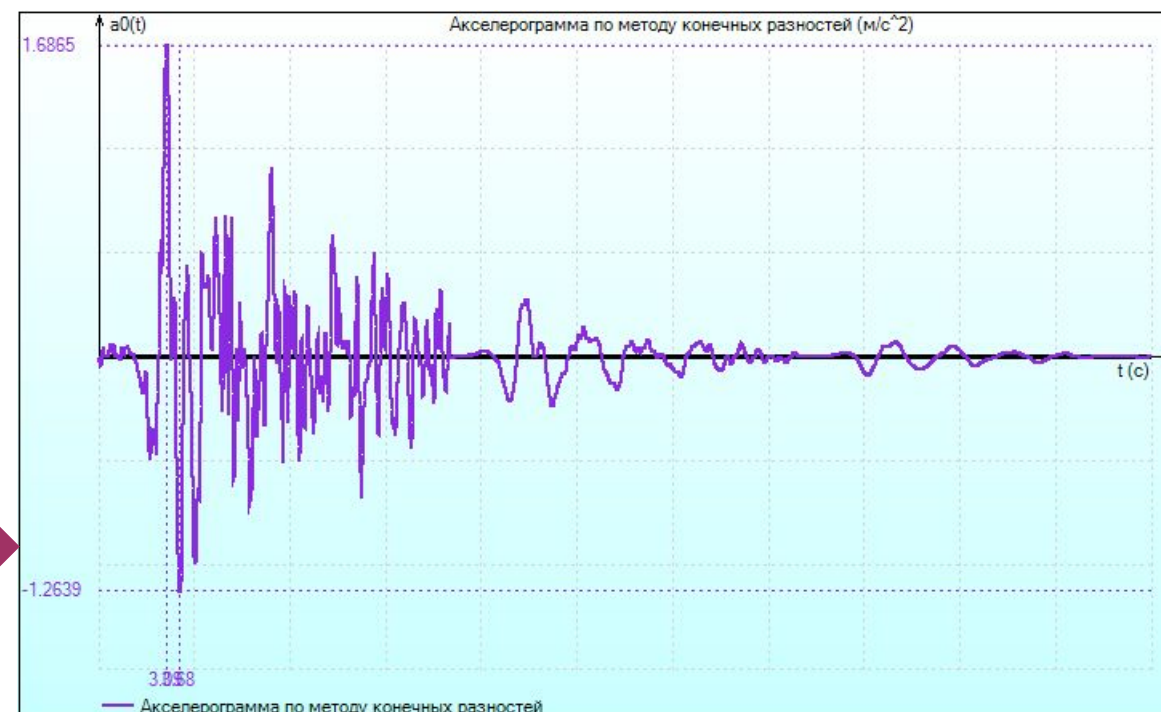
Дробление стандартного шага: 20

Построить

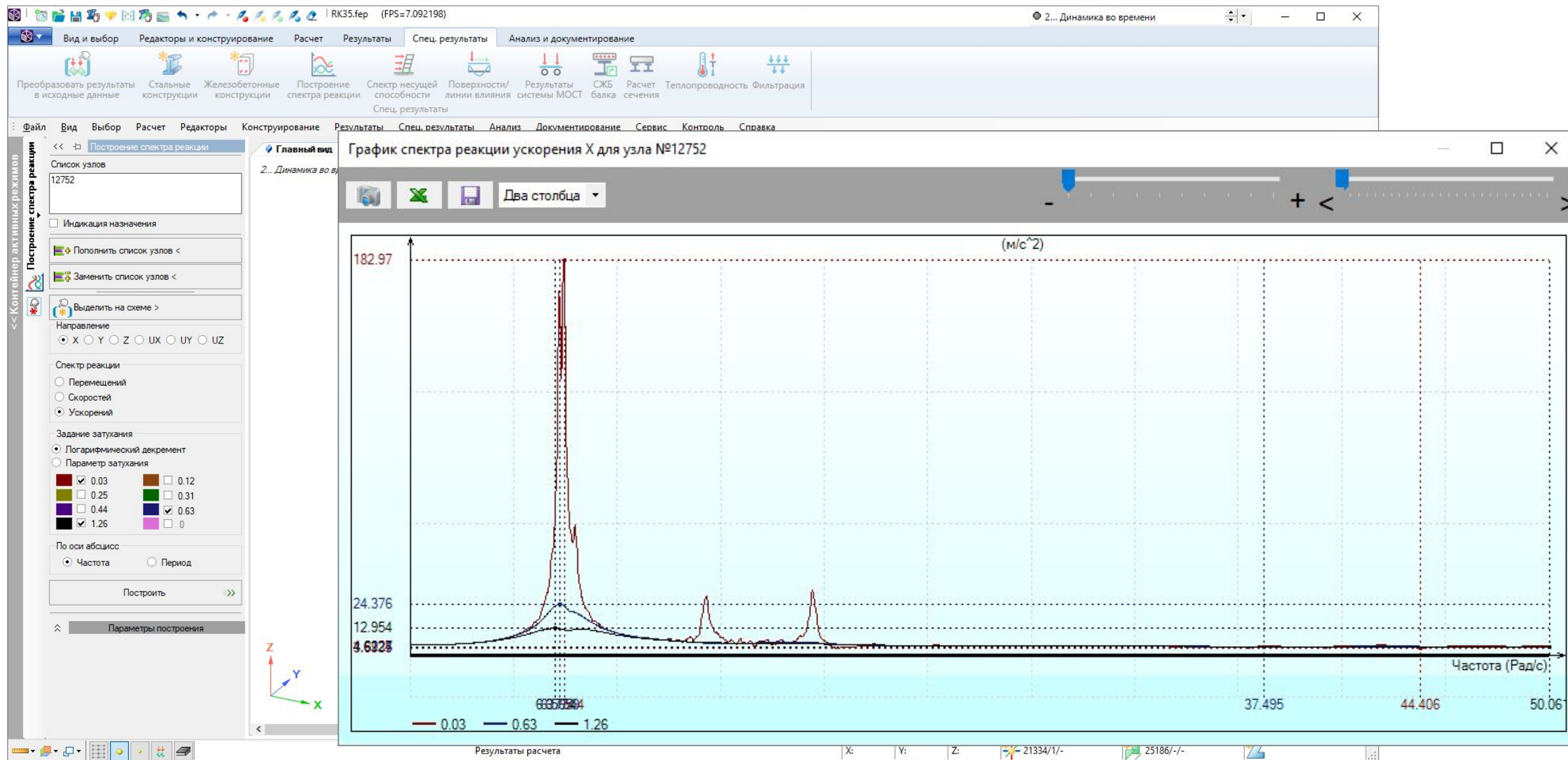
## Исходная/полученная сейсмограмма



## Полученная/исходная акселерограмма





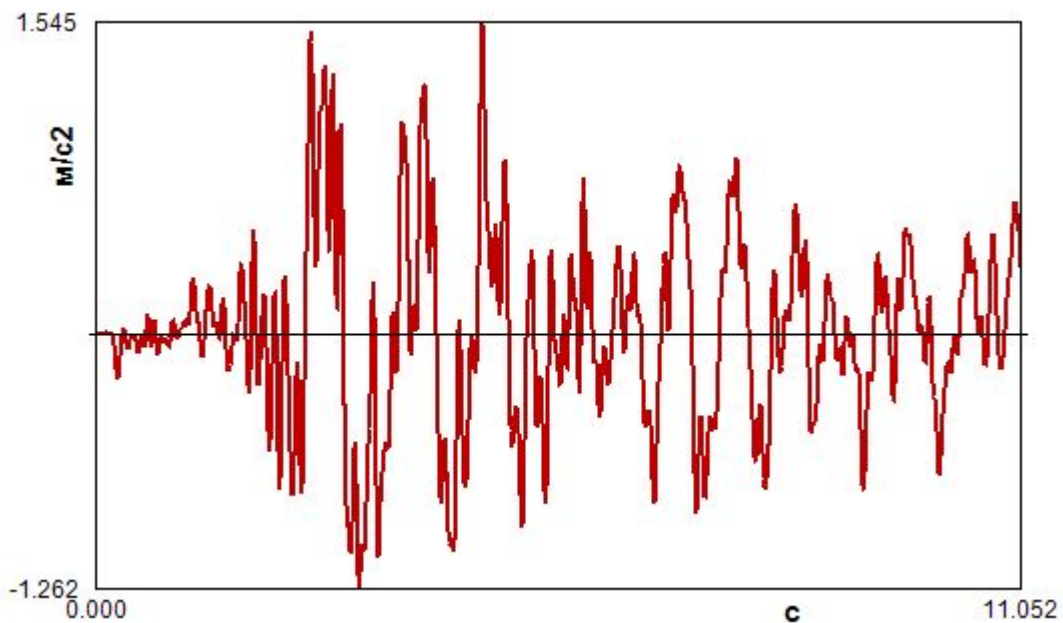


Спектры реакций могут быть построены для динамики во времени и для 27, 29 модулей динамики

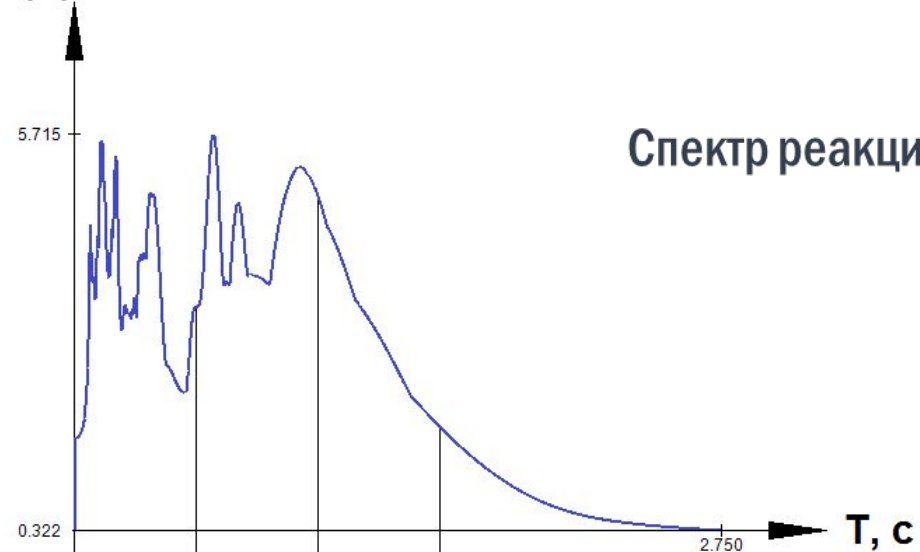
# Прочие возможности



Исходная



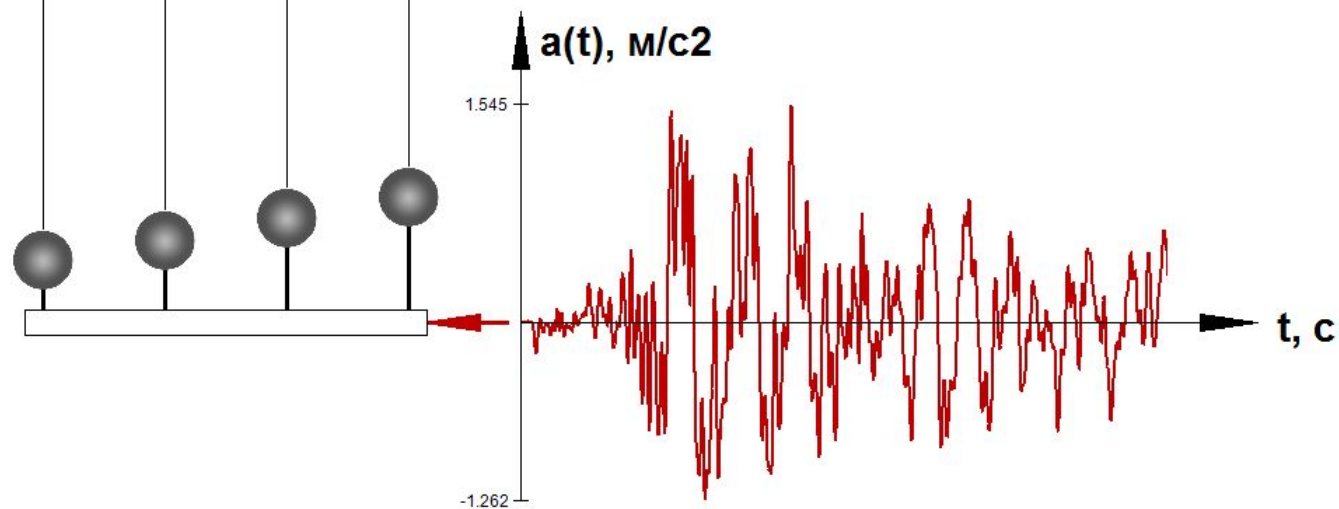
$A(T), m/c^2$



Спектр реакции ( $\xi = 0.03$ )



Переход от акселерограммы к спектру реакции



Построение усредненного спектра реакции по пакету акселерограмм

Выбор акселерограмм

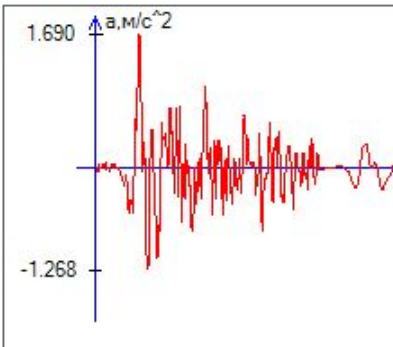
Список акселерограмм:

- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'

Добавить текущую

Изменить масштабный множитель

Удалить текущую акселерограмму



1.690  $\text{a, м/с}^2$

-1.268

Прочитать акселерограмму из файла...

Параметры построения

Спектр реакции по

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

- 0.004774
- 0.019095
- 0.039757
- 0.049278
- 0.069857
- 0.099767
- 0.196620
- 0.05

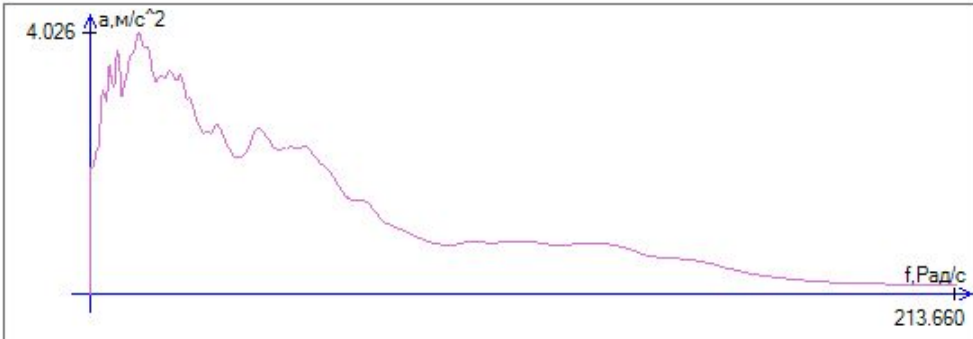
Построить

Построение усредненного спектра реакции по пакету акселерограмм

Выбор акселерограмм Спектр реакции

Спектр реакции ускорения одномассового осциллятора

Масштабный множитель к спектру реакции 1



4.026  $\text{a, м/с}^2$

f, Рад/с

213.660

Комментарий

Усредненный график спектра реакции ускорения по акселерограммам 000155XA

Сохранить в файл

Передать в 41 модуль динамики

	Частота, Рад/с	Спектр, м/с <sup>2</sup>
▶ 1	0	1.937183333333
2	0.031415926535...	1.93730689998644
3	0.062831853071...	1.9375625586158
4	0.094247779607...	1.93793471405645
5	0.125663706143...	1.93840875887226
6	0.157079632679...	1.93897988279386
7	0.188495559215...	1.93965979573674
8	0.219911485751...	1.94047903060798
9	0.251327412287...	1.94148350113213
10	0.282743338823...	1.94272534642926
11	0.314159265358...	1.94424951137167

Параметры построения

Спектр реакции по

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

- 0.004774
- 0.019095
- 0.039757
- 0.049278
- 0.069857
- 0.099767
- 0.196620
- 0.05

Управляющие параметры

Значение предельной частоты 213.63 Рад/с

Дробление стандартного шага 20

Построить

Построение усредненного спектрального коэффициента динамичности по пакету акселерограмм

**Выбор акселерограмм**

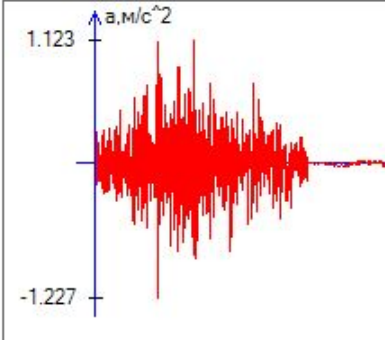
Список акселерограмм:

- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'
- F:\\_Projects\PrideAll\_10.8\Bin\_x32'

Добавить текущую

Изменить масштабный множитель

Удалить текущую акселерограмму



Прочитать акселерограмму из файла...

Параметры построения

Козф. динамичности по

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

<input type="radio"/> 0.004774	<input type="radio"/> 0.019095
<input type="radio"/> 0.039757	<input type="radio"/> 0.049278
<input type="radio"/> 0.069857	<input type="radio"/> 0.099767
<input type="radio"/> 0.196620	<input checked="" type="radio"/> 0.05


Построить

**Построение усредненного спектрального коэффициента динамичности по пакету акселерограмм**

Выбор акселерограмм: **Кoeffициент динамичности**

Спектральный коэффициент динамичности по ускорениям

Масштабный множитель к коэффициенту динамичности: 1



	Период, с	Козф.
▶ 1	0.029407440082...	0.0892496342913462
2	0.029537734455...	0.0894452840635668
3	0.029669188547...	0.089644016139291
4	0.029801817910...	0.0898369929808975
5	0.029935638377...	0.0900254118199865
6	0.030070666065...	0.0902304690365375
7	0.030206917384...	0.0904332907647535
8	0.030344409042...	0.090637142917538
9	0.030483158055...	0.0908417015719213
10	0.030623181748...	0.0910607568811047
11	0.030764497769...	0.0912754645420327

Комментарий

Усредненный график спектрального коэффициента динамичности по ускорениям для

Сохранить в файл

Передать в 60 модуль динамики

Параметры построения

Козф. динамичности по

- перемещениям
- скоростям
- ускорениям

Задание затухания

- Логарифмический декремент
- Параметр затухания

<input type="radio"/> 0.004774	<input type="radio"/> 0.019095
<input type="radio"/> 0.039757	<input type="radio"/> 0.049278
<input type="radio"/> 0.069857	<input type="radio"/> 0.099767
<input type="radio"/> 0.196620	<input checked="" type="radio"/> 0.05

Управляющие параметры

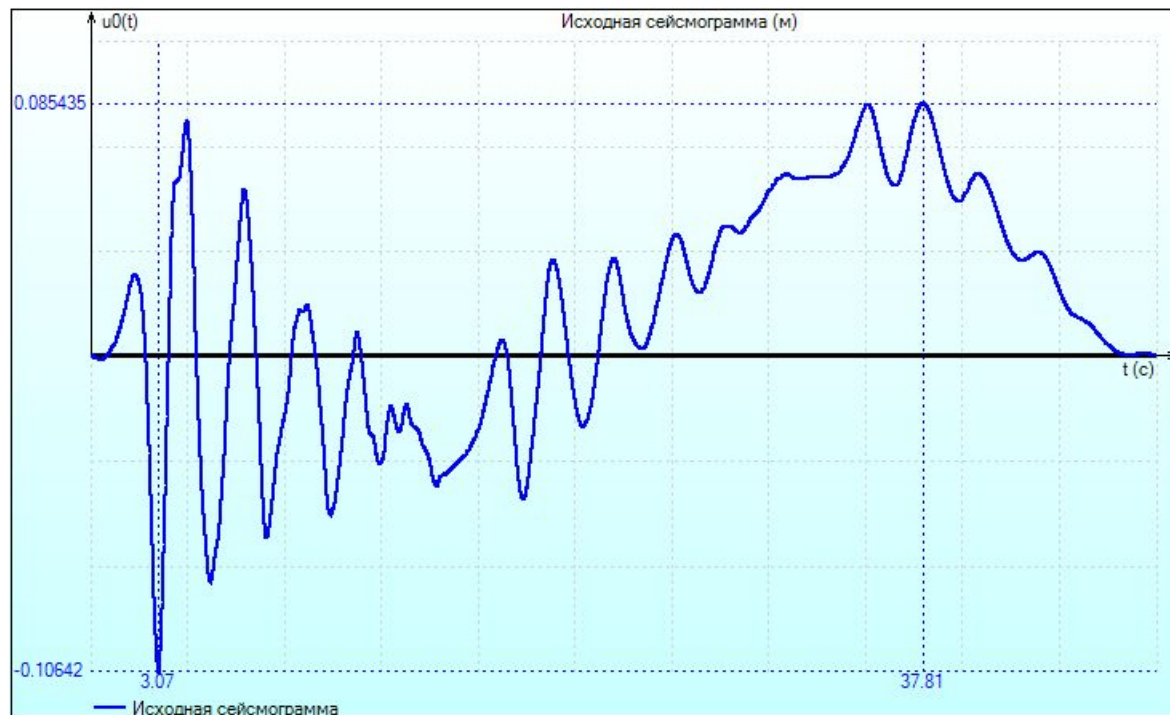
Значение предельной частоты: 213.63 Рад/с

Дробление стандартного шага: 20

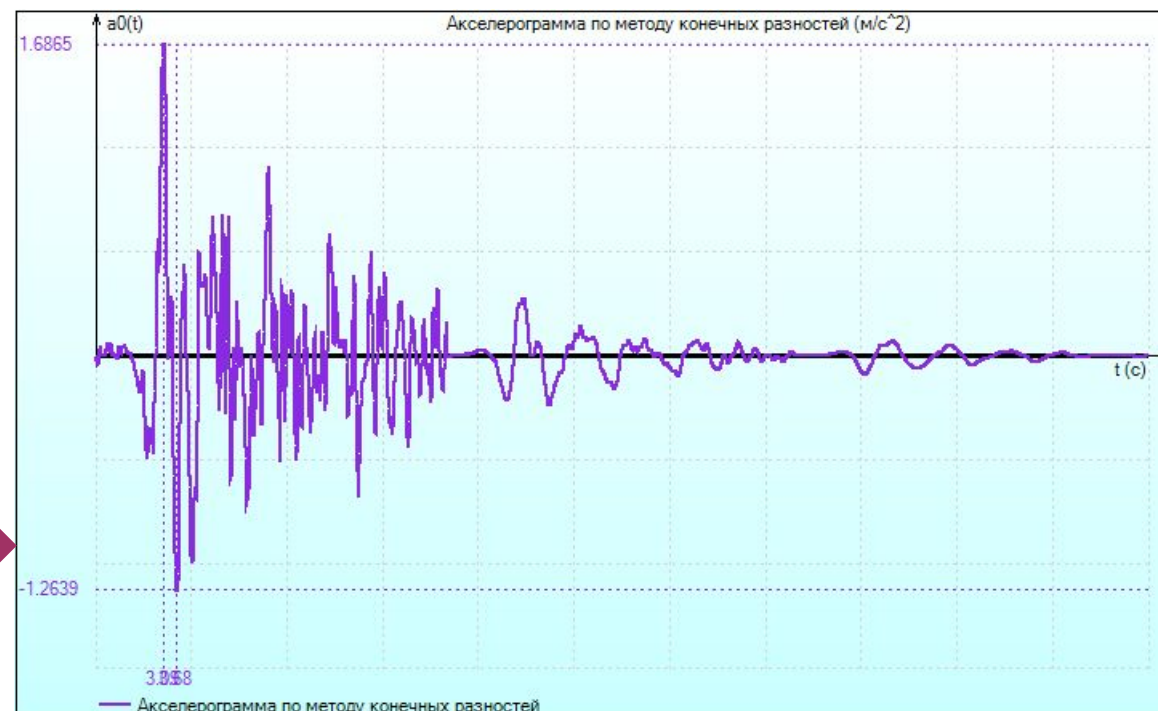
Построить



## Исходная/полученная



## Полученная/исходная





Получение сейсмограммы по акселерограмме

CA-482.ar1

Удаление тренда акселерограммы: 0

Метод получения сейсмограммы: Метод центральных разностей

Удаление тренда сейсмограммы: 0

Поворот нулевой линии

Получение сейсмограммы

**Исходная акселерограмма**

- Линия тренда акселерограммы
- Акселерограмма с учетом линии тренда
- Велосиграмма по методу конечных разностей
- Сейсмограмма по методу конечных разностей
- Линия тренда сейсмограммы
- Нулевая линия сейсмограммы
- Сейсмограмма с учетом линии тренда и нулевой линии
- Велосиграмма, полученная дифференцированием сейсмограммы
- Акселерограмма, полученная дифференцированием сейсмограммы
- Разность между исходной и полученной акселерограммами

Показать график

Сохранение графика

Точность: 6

Получение акселерограммы по сейсмограмме

000155YA(t)\_DBN\_V\_1\_1\_12\_2014.sr1 Открыть

Удаление тренда сейсмограммы: 0

Метод получения акселерограммы: Метод центральных разностей

Удаление тренда акселерограммы: 0

Поворот нулевой линии

$\omega_k = 207.345115136926$  Рад/с

$d\omega = 0.628318530717959$  Рад/с

$\xi = 0.05$

Получение акселерограммы

Преобразование Фурье

Спектр реакции

**Исходная сейсмограмма**

- Линия тренда исходной сейсмограммы
- Сейсмограмма с учетом линии тренда
- Велосиграмма по методу конечных разностей
- Акселерограмма по методу конечных разностей
- Линия тренда акселерограммы
- Нулевая линия акселерограммы
- Акселерограмма с учетом линии тренда и нулевой линии

Амплитудно-частотный спектр

Фазово-частотный спектр

Спектр мощности

Односторонняя спектральная плотность

Спектр реакции перемещений

Спектр реакции скоростей

Спектр реакции ускорений

Показать график

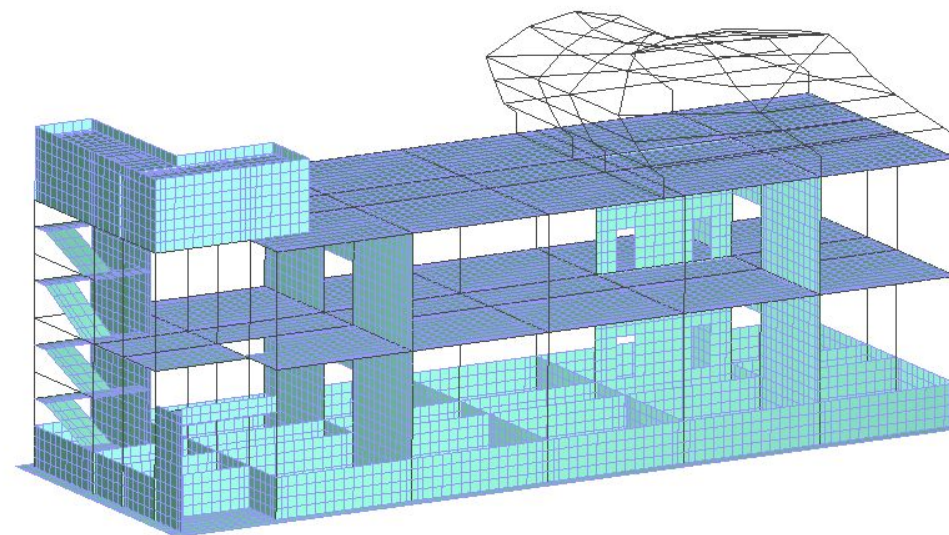
Сохранение графика

Точность: 6

Сохранить



Это пример сооружения, когда удержание 33 собственных форм колебаний собирает лишь 0.15% модальной массы





Первая форма собственных колебаний после конденсации масс

Исключение элементов из расч

Загрузка	Форма	Собственное значение	Частота (Рад/с)	Период (с)	Коеф. динам. $\beta_x$	Коеффициент распределения	Модальная масса (%)	Суммарная модальная масса (%)
2	1	0.00123753	28.426	0.22103	2.5	1.29717	61.4895	61.4895
2	2	0.000419086	48.848	0.12863	2.5	0.074365	0.056167	61.5457
2	3	0.000295604	58.163	0.10803	2.5	0.0167897	0	61.5496
2	4	0.000178726	74.801	0.083999	2.25998	-1.2558	5.52699	67.0765
2	5	0.000160126	79.026	0.079508	2.19262	1.00209	2.83724	69.9138
2	6	0.000134289	86.294	0.072812	2.09217	-0.126196	0.0166804	69.9305
2	7	0.000125582	89.235	0.070412	2.05617	-0.120508	0.026722	69.9572
2	8	0.000118445	91.884	0.068381	2.02572	-0.0211864	0	69.958

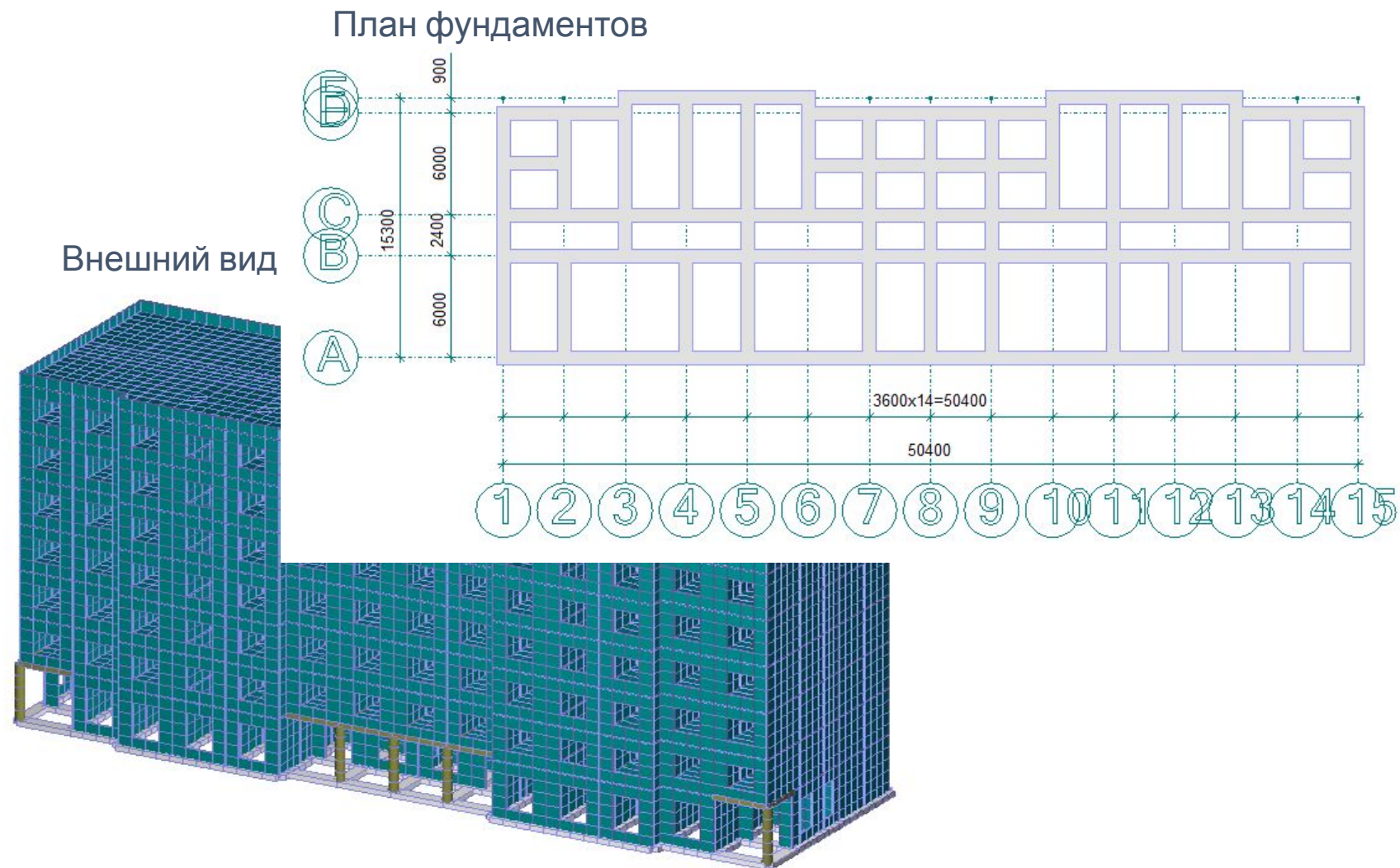
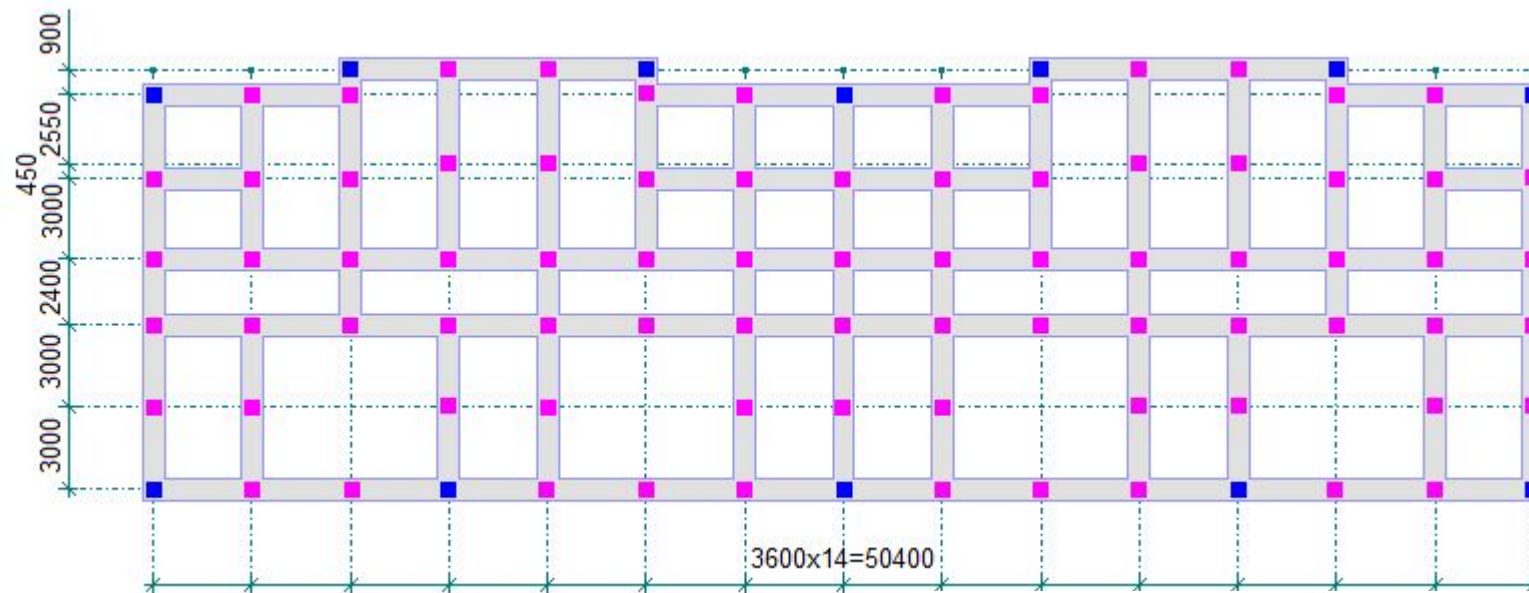



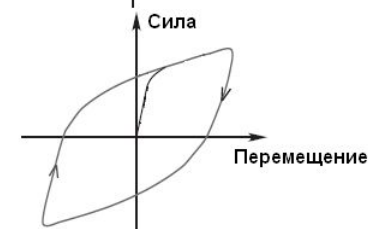
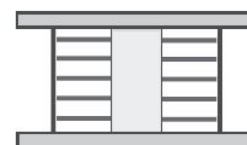
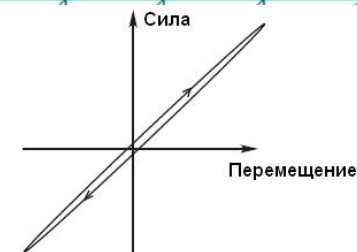
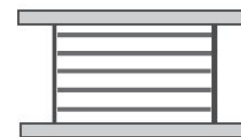


Схема расположения сейсмоизолирующих опор



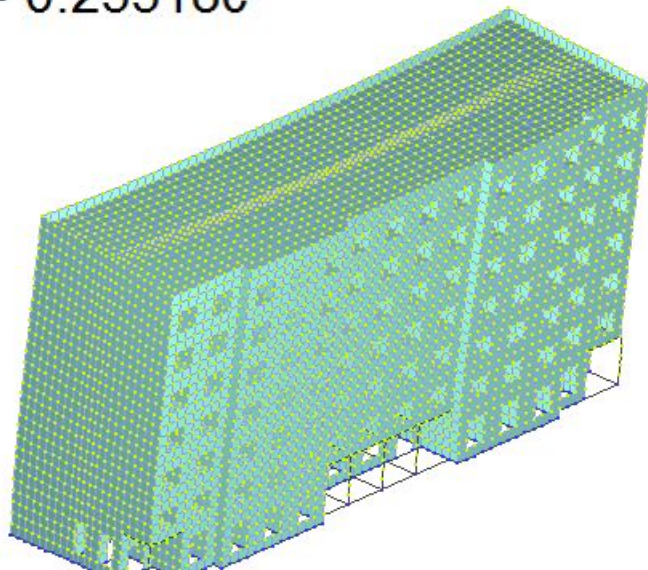
 - GZR400V5A (78шт)

 - GZY400V5A (12шт)

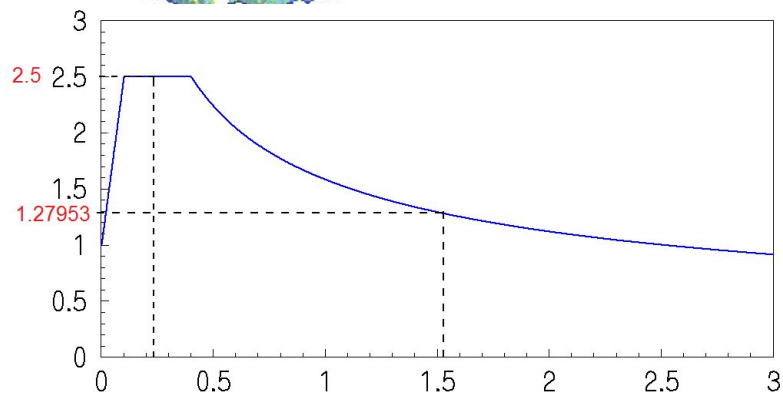
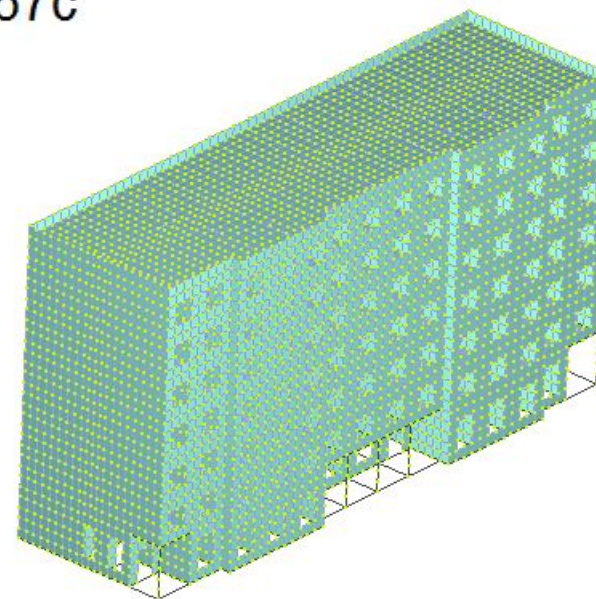


Был выполнен модальный анализ здания без и с сейсмоизолирующими опорами

$T_1 = 0.23318\text{c}$



$T_1 = 1.5267\text{c}$

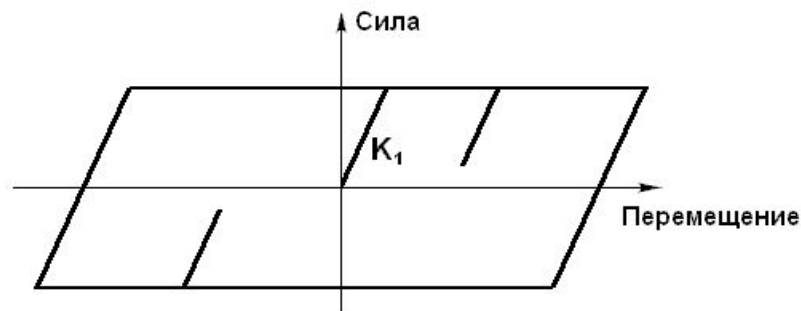


Только за счет установки сейсмоизолирующих опор практически в 2 раза снижены нагрузки от сейсмике

## Моделирование работы сейсмоизолирующих опор в динамике во времени

Для моделирования действительной диаграммы работы опор типа GZR400V5A подойдут КЭ типа 55

В ПК ЛИРА есть КЭ типа 255 с учетом предельных усилий и его диаграмма работы



Для моделирования действительной диаграммы работы опор типа GZY400V5A необходимо ввести параллельно еще и линейный КЭ типа 55

Этапы нагружения комбинированного элемента

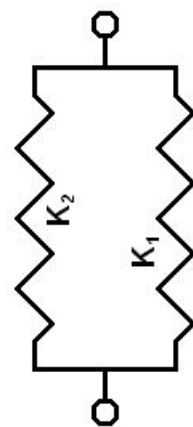
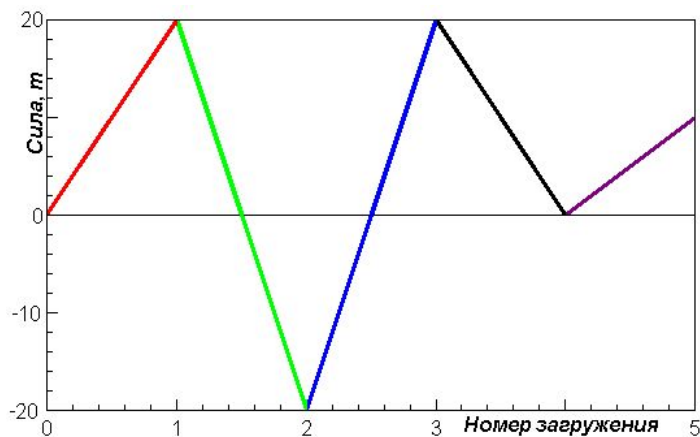
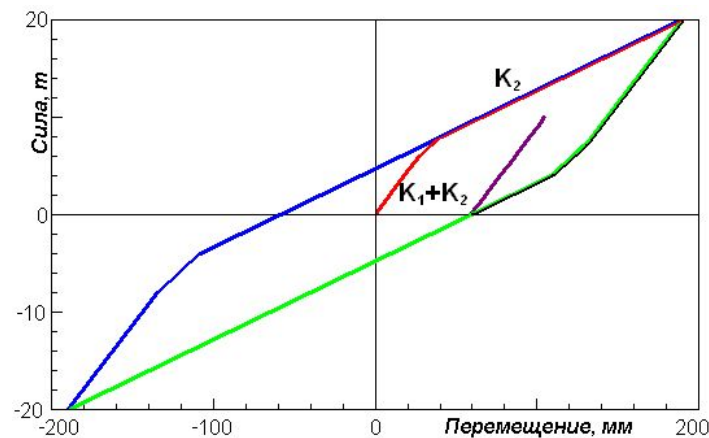
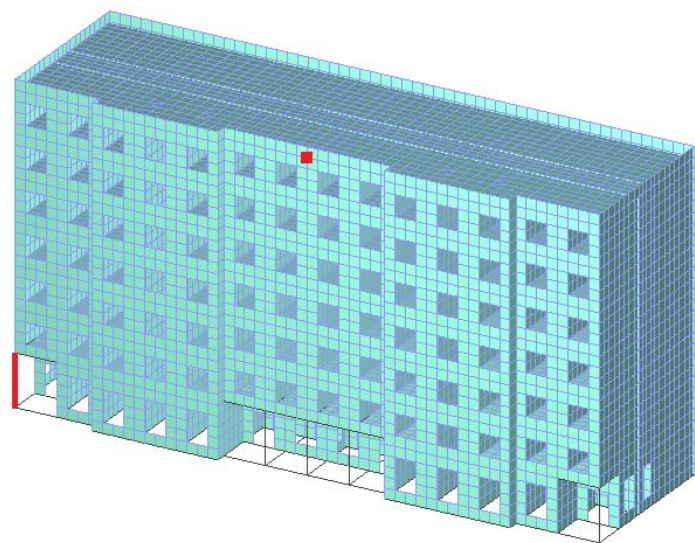


Диаграмма работы комбинированного элемента

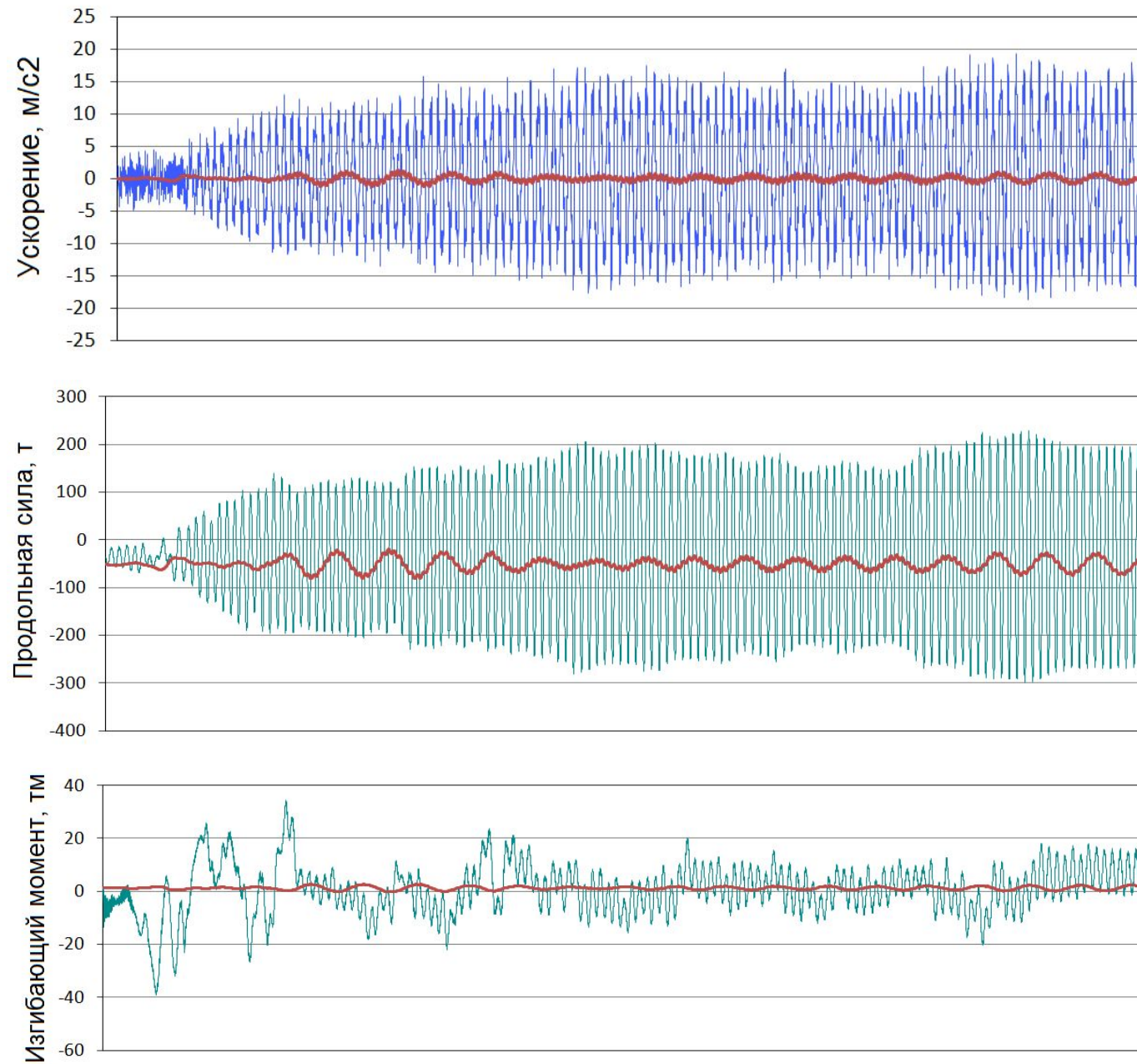
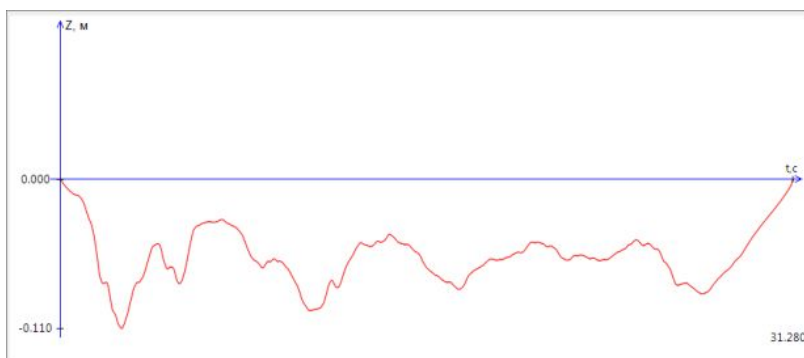




## Сравнение результатов

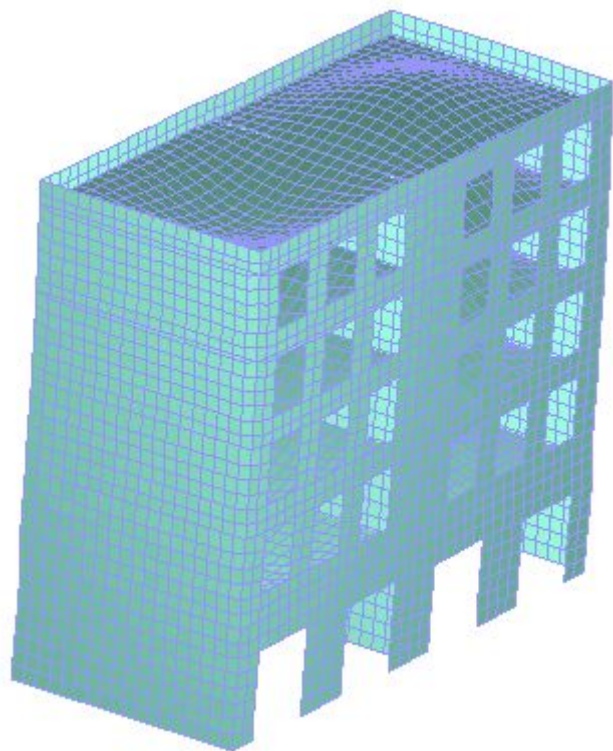


## Сейсмограмма





Конструкция, у которой  
 существенный вклад дает только 9  
 форма собственных колебаний



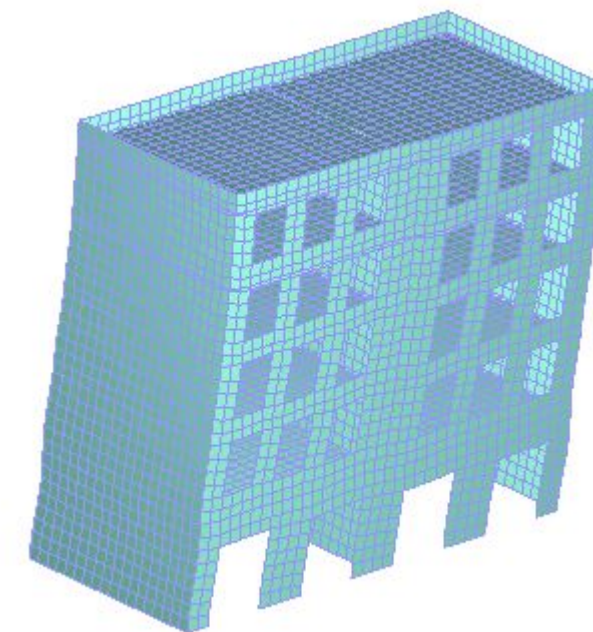
9 форма

Модальная масса (%)
0.183121
0.0117072
0.792005
4.76912
6.64576
0
0
0
0
68.8447
0

Конденсация масс



Результат  
 применения  
 конденсации масс



1 форма

Модальная масса (%)
81.0158
0
0
2.00589
0
0.957866
11.1211
0
0
0

Изменение первой частоты  
 составило

$$\frac{65.279 - 64.891}{65.279} \cdot 100\% = 0.59\%$$

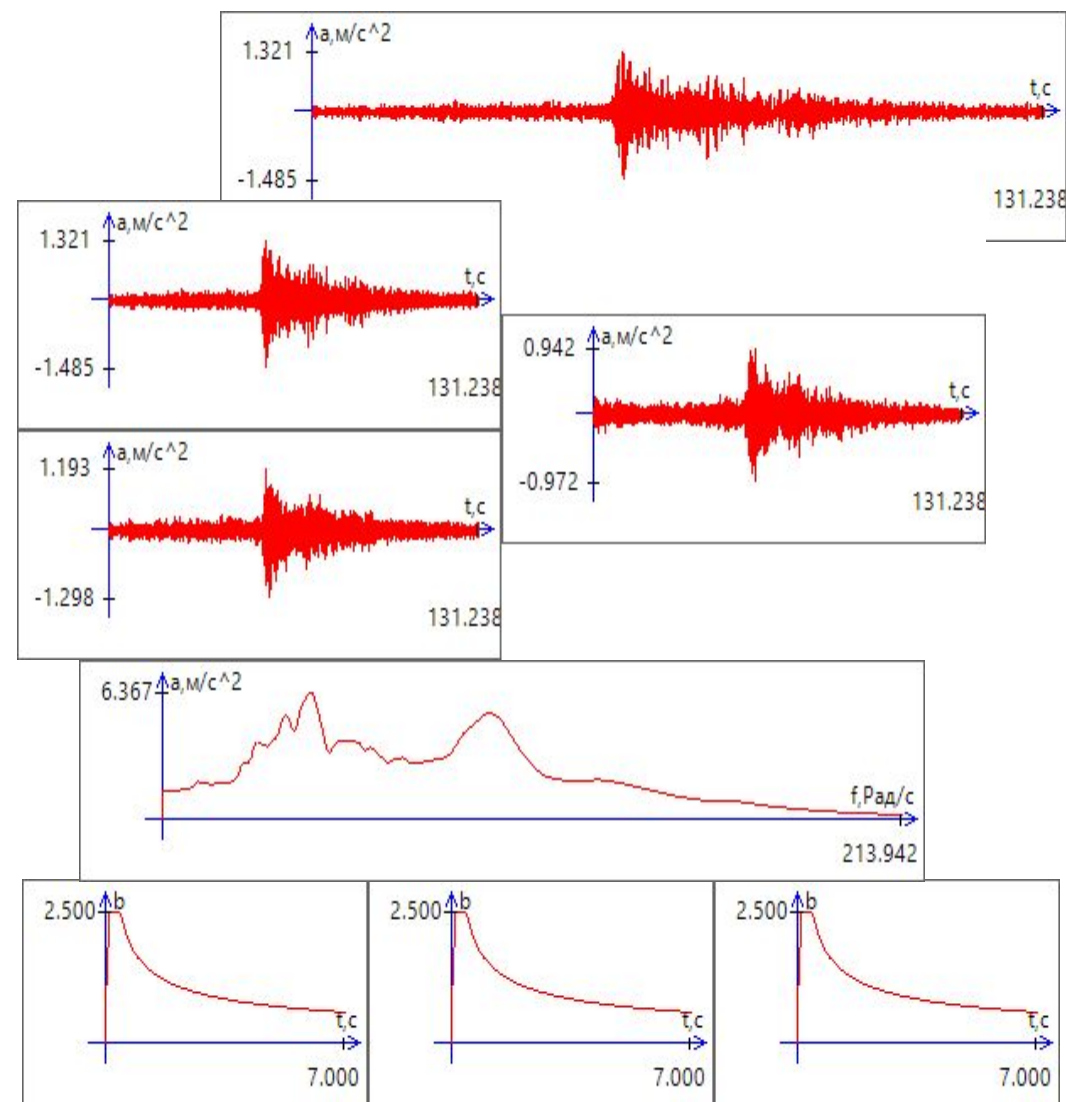
Дополнительные модули расчета на сейсмические воздействия, реализованные в ПК  
ЛИРА 10.8

Модуль 27 – сейсмическое воздействие по однокомпонентной акселерограмме

Модуль 29 – сейсмическое воздействие по трехкомпонентной акселерограмме

Модуль 41 – сейсмическое воздействие по спектру реакции одномассового осциллятора

Модуль 60 – сейсмическое воздействие по трехкомпонентным графикам спектрального коэффициента динамичности



$$\Gamma_i = \frac{(\gamma^T \cdot M \cdot \varphi_i)^2}{(\varphi_i^T \cdot M \cdot \varphi_i)(\gamma^T \cdot M \cdot \gamma)} \cdot 100\%$$

$M$  – матрица масс,

$\varphi_i$  –  $i$ -тая форма собственных колебаний,

$\gamma$  – вектор направляющих косинусов сейсмического воздействия

Нормативный документ	Требуемый процент вклада модальной массы	
	горизонтальные	вертикальные
СП 14.13330.2014	90	75
ДСТУ Н EN 1998-1:2010	90	90
ДБН В.1.1-12:2014	85	75
СП РК 2-03-30:2017	90	90



# Прямое интегрирование уравнений движения

Аппроксимация  
ускорений

$$u''(t) = \frac{u(t + \Delta t) - 2 \cdot u(t) + u(t - \Delta t)}{\Delta t^2}$$

Аппроксимация  
скоростей

$$u'(t) = \frac{u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)}{2 \cdot \Delta t}$$

Аппроксимация  
перемещений

$$u(t) = \frac{u(t + \Delta t) + u(t - \Delta t)}{2}$$

После подстановки и выражения перемещений в момент времени  $u(t + \Delta t)$ , получим

$$\left[ \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2 \cdot \Delta t} + \frac{K}{2} \right] \cdot u(t + \Delta t) = -F(t) + \frac{2 \cdot M}{\Delta t^2} u(t) - \left[ \frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2 \cdot \Delta t} + \frac{K}{2} \right] \cdot u(t - \Delta t)$$

Моделирование связями

Моделирование КЭ неотражающих границ

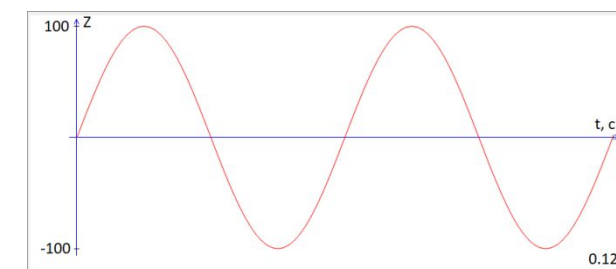
Неотражающие граничные условия задаются в виде:

$$\sigma_n = c_n \cdot \rho \cdot u'_n,$$

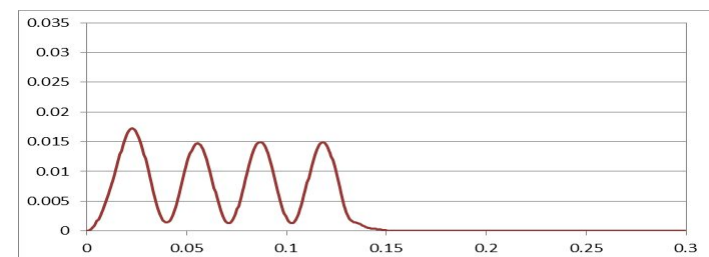
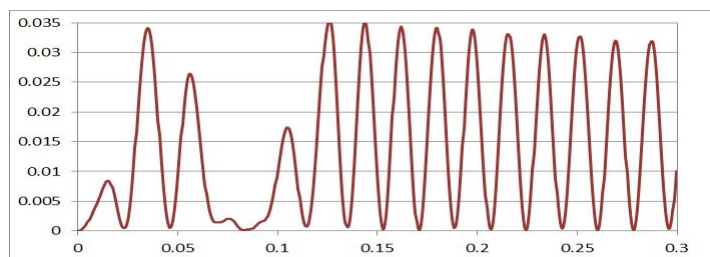
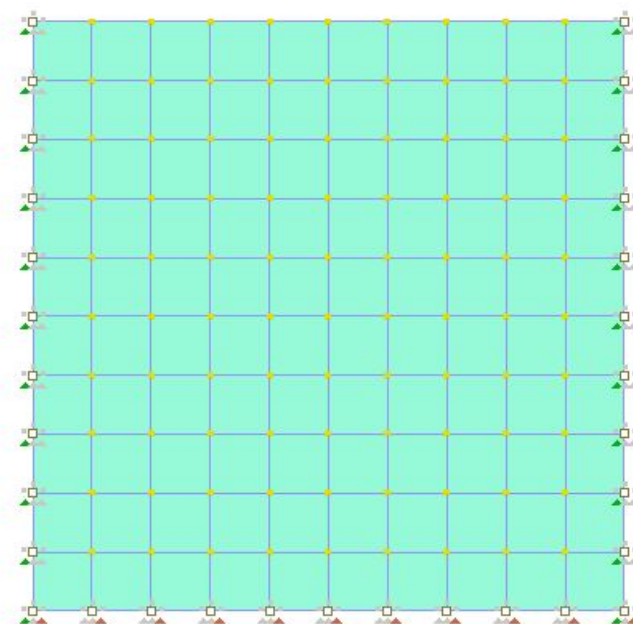
$$\sigma_\tau = c_\tau \cdot \rho \cdot u'_\tau,$$

где  $c_n, c_\tau$  – скорости продольной и поперечной волн,  
 $\rho$  – плотность грунта

Приложенная нагрузка

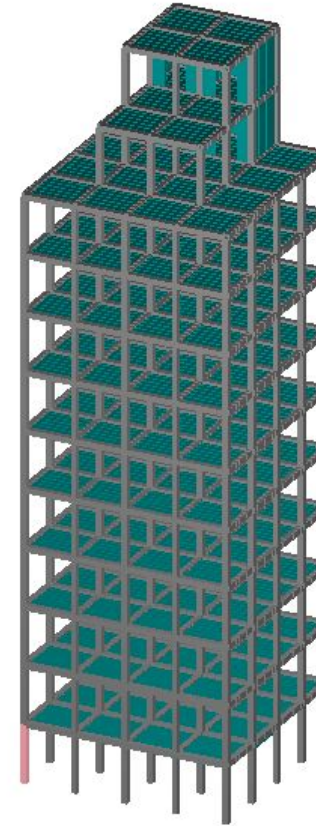


2... Динамика во времени  
 Массы собраны из: плотность  
 Распре Y=0

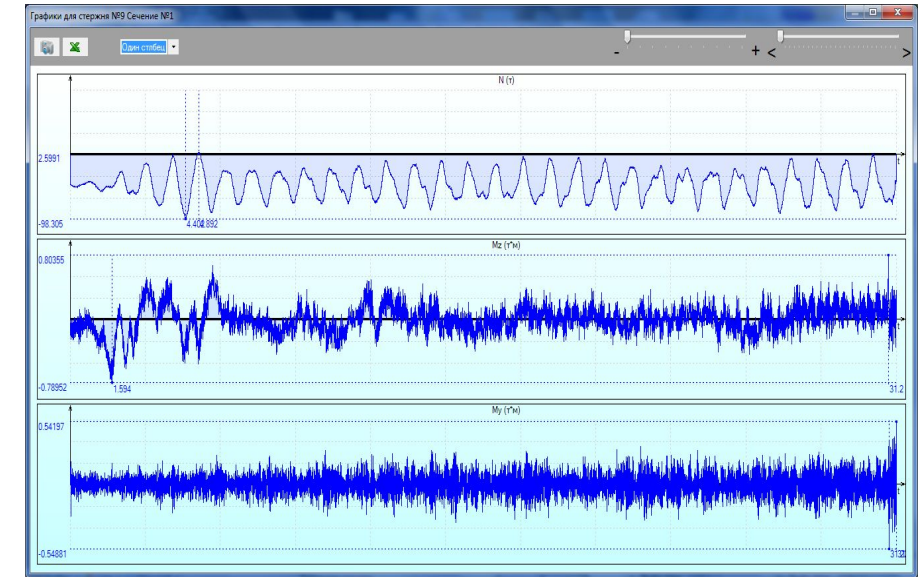




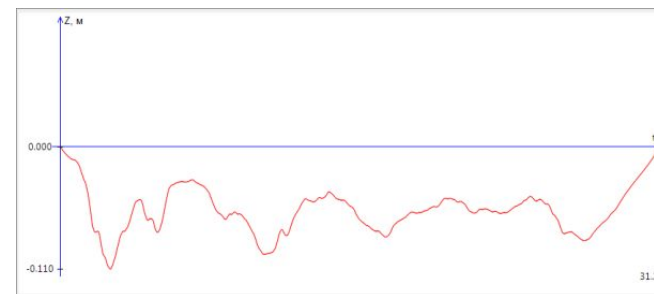
## Анимация стадий монтажа



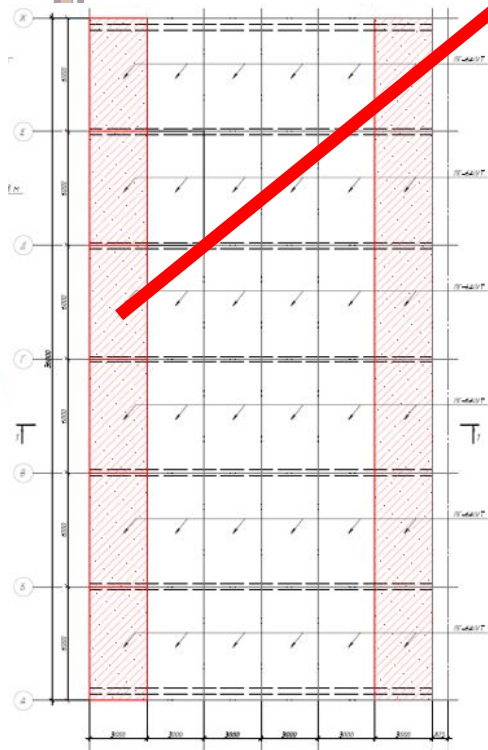
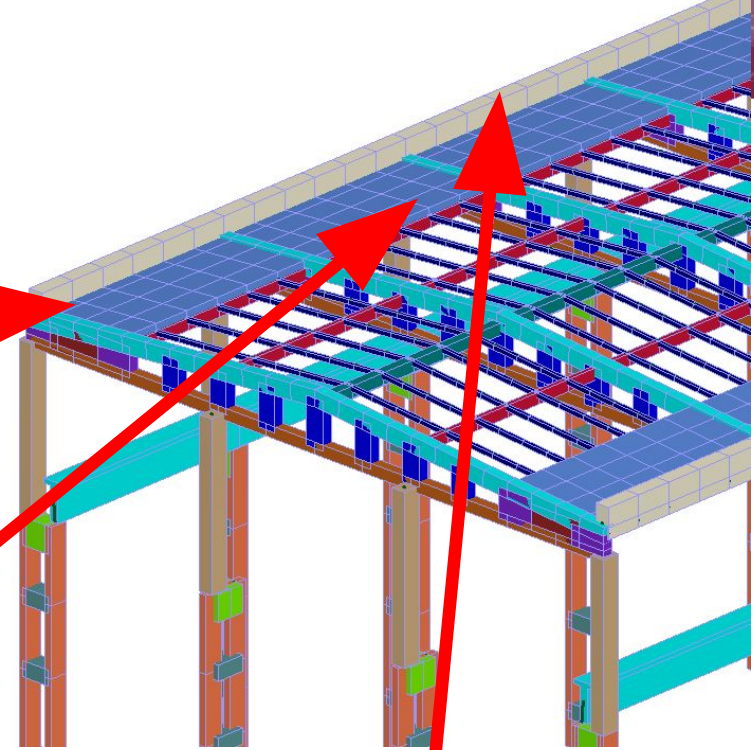
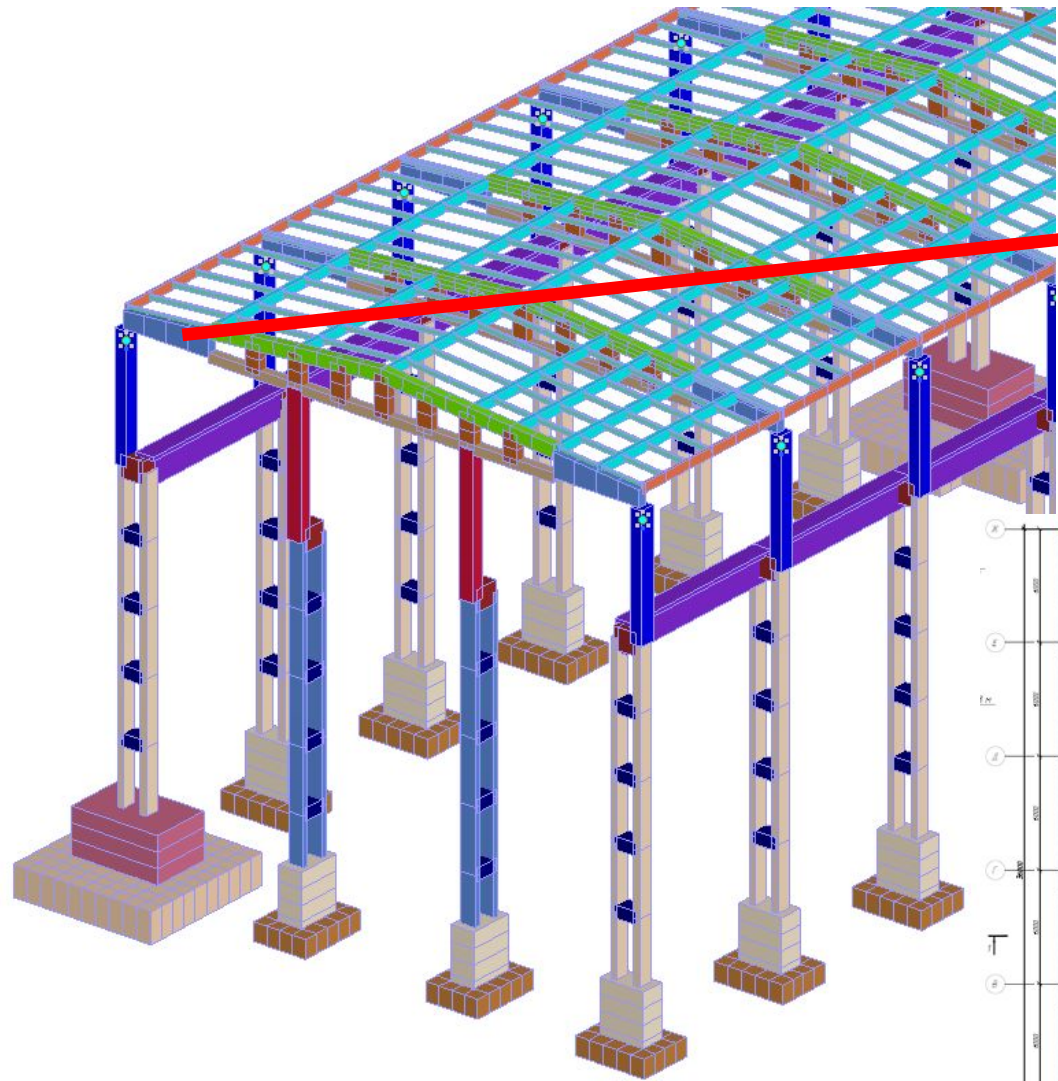
Сейсмограмма



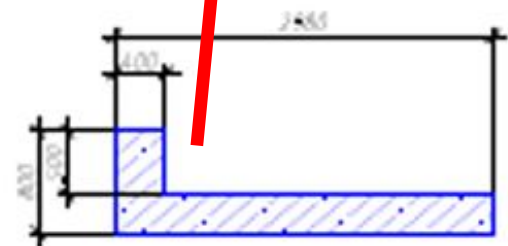
После окончания процесса возведения здания выполняется расчет по динамике во времени, например, на сейсмограмму землетрясения.



# Усиление Промышленного здания



Монолитный участок усиления покрытия (1500)

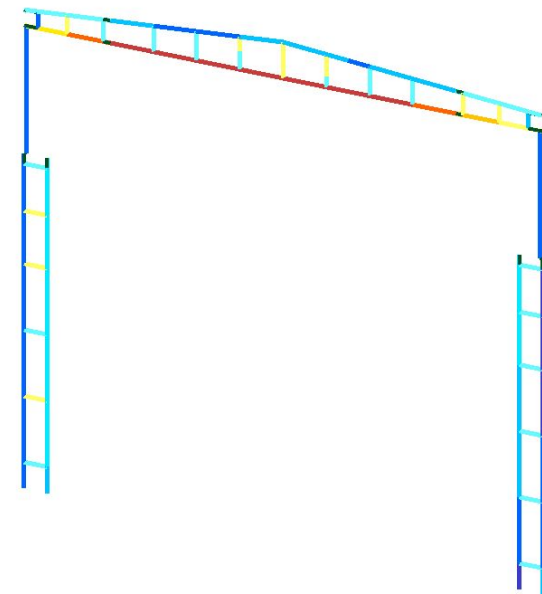
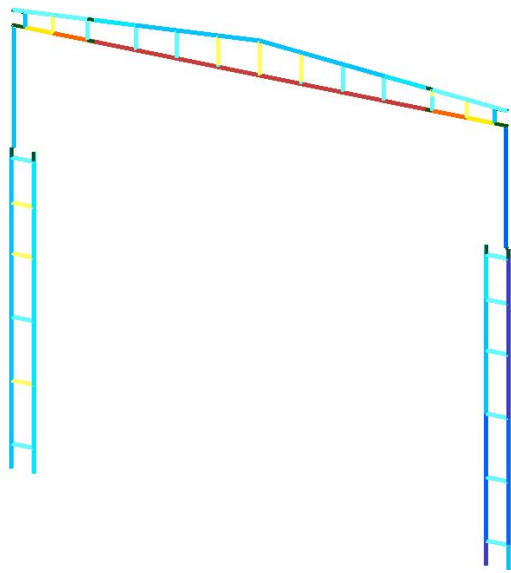


Учет (неучет) существующего НДС конструкций до усиления

Усилие N в нижнем поясе фермы: 109т (72т)
















Прогиб фермы: 22 мм. (17 мм.)

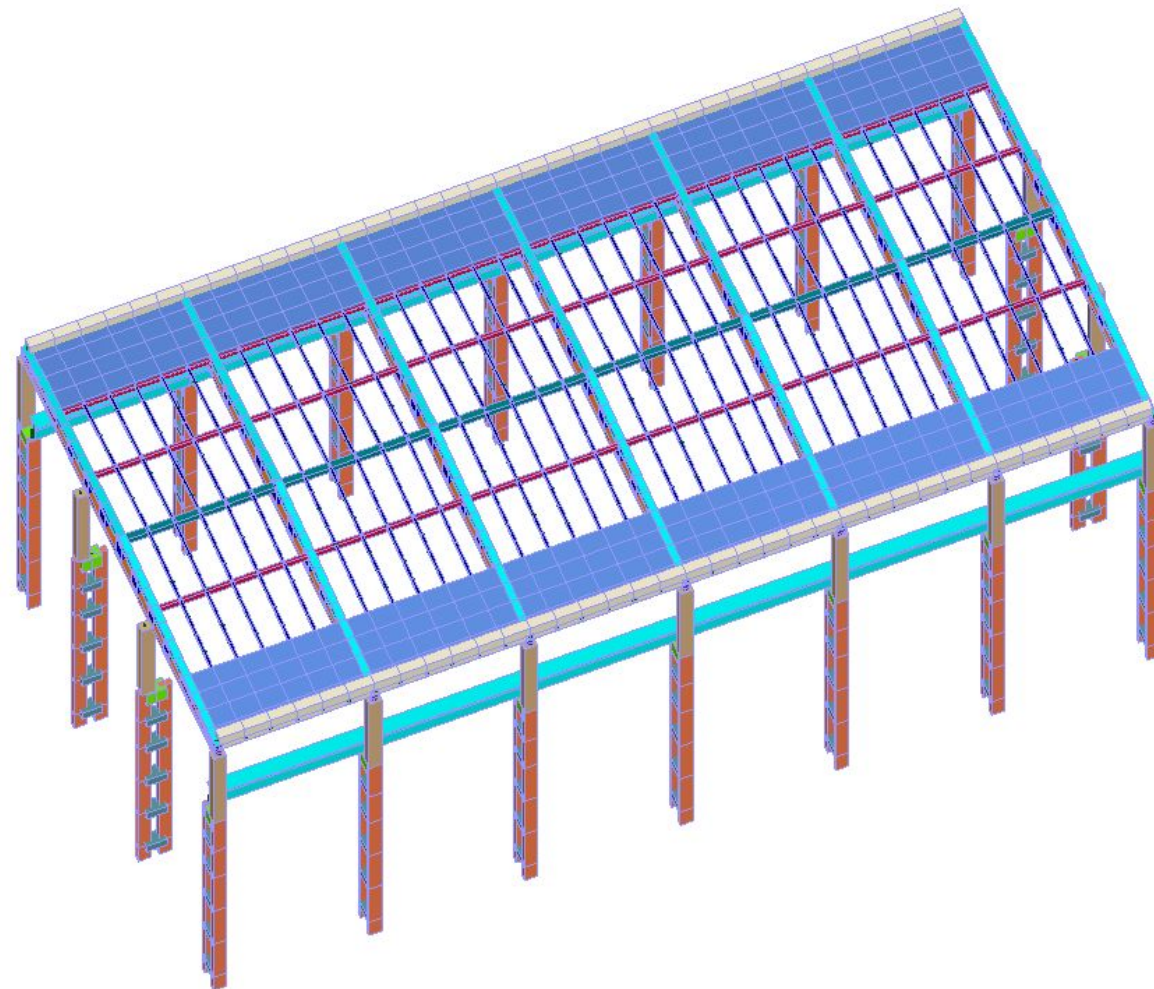
Усилие N в колонне, примыкающей к ферме: 34т (31т)





## НЕУЧЕТ существующего НДС конструкций до усиления

- Библиотека загружений
-  1. СВ
  -  2. Постоянные,
  -  3. Снег (равномерная),
  -  4. Снег (неравномерная),
  -  5. Снег (пониженная, равномерная),
  -  6. Снег (пониженная, неравномерная),
  -  7. Ветер,
  -  8. Крановая (вертикальная, слева),
  -  9. Крановая (вертикальная, справа),
  -  10. Крановая (горизонтальная),
  -  11. Крановая (пониженная, верт., слева),
  -  12. Крановая (пониженная, верт., справа),
  -  13. сейсмика по X
  -  14. Сейсмика по Y
  -  15. Сейсмика по Z



## Учет существующего НДС конструкций до усиления

### Библиотека загружений

#### 1. История возведения сооружения

1. СВ

2. Постоянные,

3. демонтаж сущ. констр.

4. монтаж усиления

5. Снег (равномерная),

6. Ветер,

7. Крановая (вертикальная, слева),

8. Крановая (горизонтальная),

#### 2. Динамика во времени

1. Динамическая нагрузка (узловые силы)

2. Демпфирование

#### 1. История возведения сооружения

1. СВ

2. Постоянные,

3. демонтаж сущ. констр.

4. монтаж усиления

5. Снег (равномерная),

6. Ветер,

7. Крановая (вертикальная, слева),

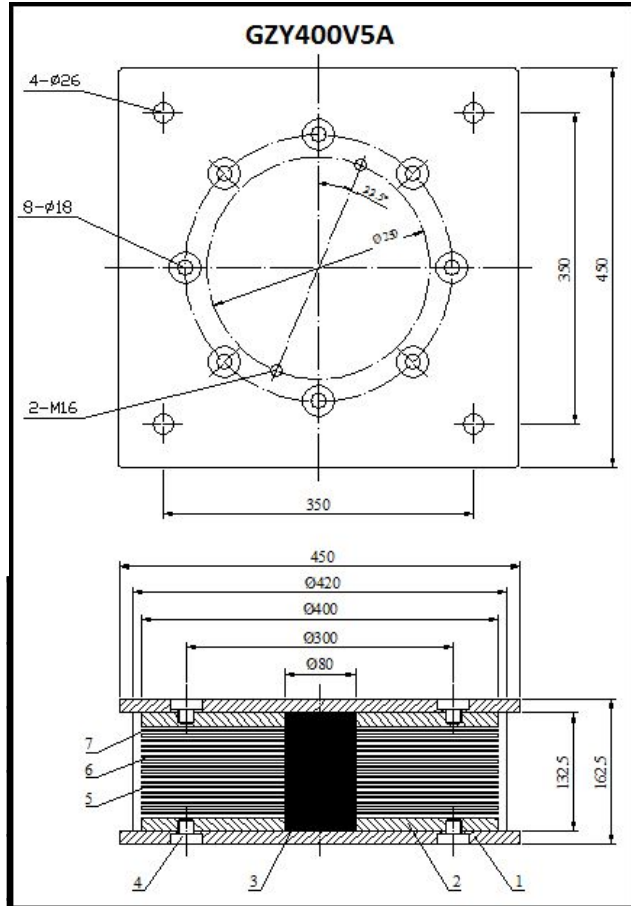
8. Крановая (горизонтальная),

2. сейсмика по X

3. сейсмика по Y

4. сейсмика по Z

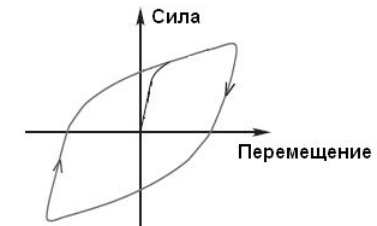
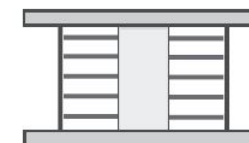
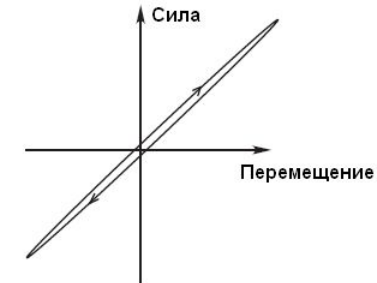
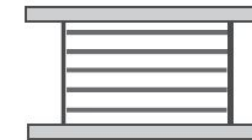




## Механические характеристики сейсмоизолирующих опор

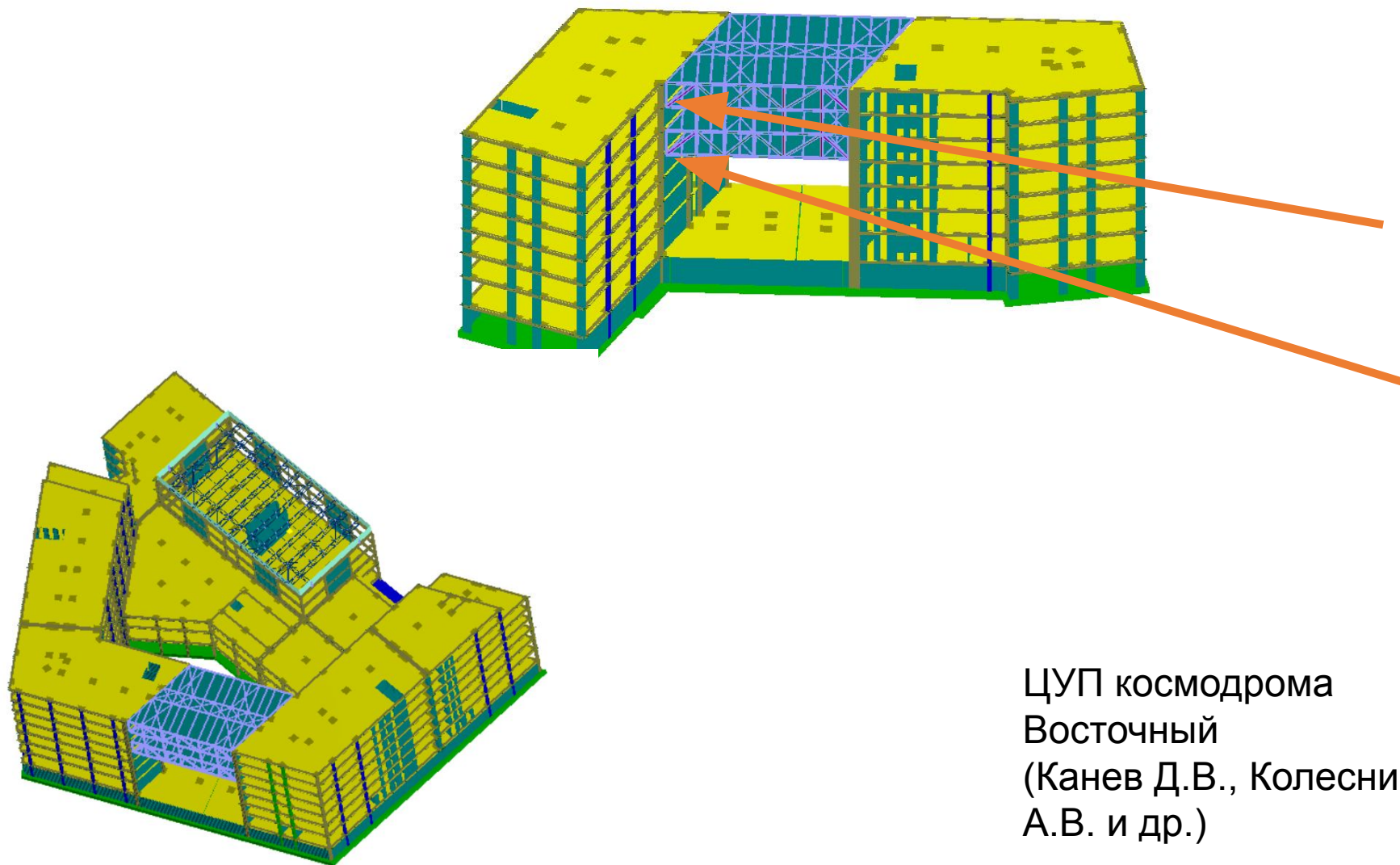


Модель	GZP400V5A	GZY400V5A	
Количество	78	12	
Эффективный диаметр, мм	400	400	
Напряжение смятия (МПа)	10	10	
Проектное перемещений (мм)	68	69	
Максимальное перемещение (мм)	193	206	
Вертикальная жесткость (кН/мм)	1097	1690	
Горизонтальные деформации (50%)	Горизонтальная жесткость (кН/мм)	0.87	2.14
	Декремент затухания (%)	5	27
Горизонтальные деформации (25%)	Горизонтальная жесткость (кН/мм)	0.74	1.06
	Декремент затухания (%)	3.6	14

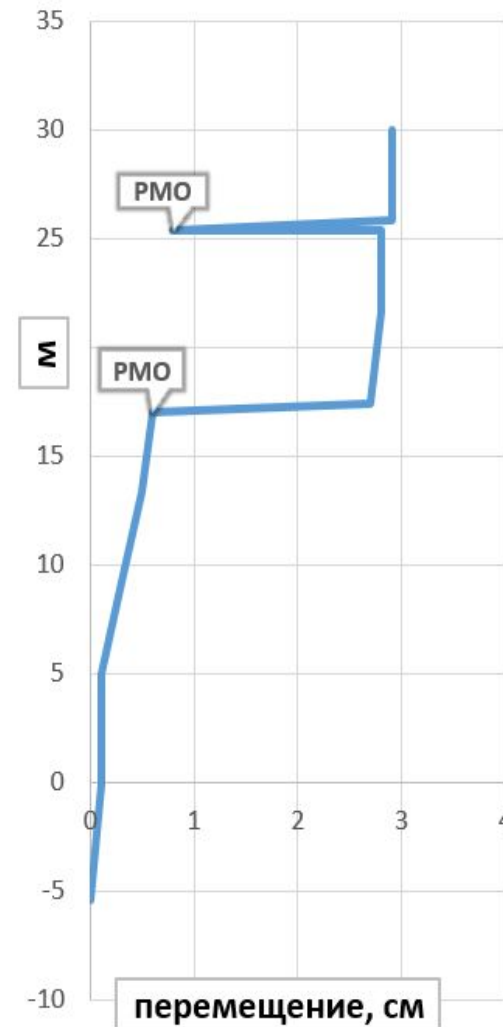




# Исследование реакции сейсмоизолированного здания с применением резинометаллических сейсмоизоляторов



Вертикальный профиль перемещения здания от действия синтезированной акселерограммы в направлении ОХ по оси 4 в момент времени  $t = 1.75$  с



# Реализация физ. нелинейности при использовании модуля Динамика+

Главный вид **Загрузки**

Добавить загрузку  $\Sigma(+)$  Добавить сочетание  $\left[ \downarrow \downarrow \right]$  Удалить  $\left[ \downarrow \times \right]$  РСУ/РЧН ( Не использовать ) Импорт загрузок

Динамика во времени : Динамическая нагрузка (правая часть) ( Динамическая нагрузка (правая

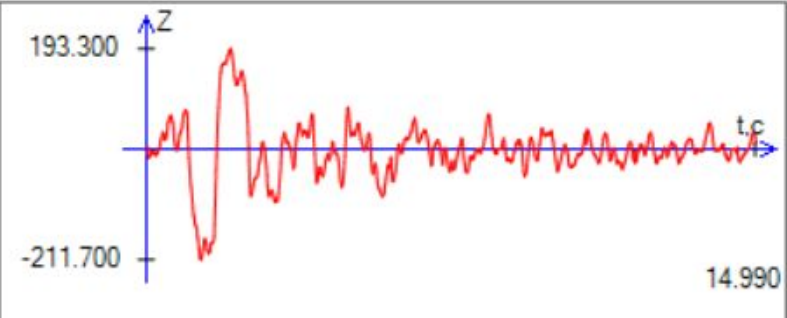
Имя Динамическая нагрузка (правая часть)  
Описание

Закон изменения правой части

Шаблон  Масштабный множитель к закону

Библиотека загрузок

- 1. Нелинейное статическое загрузке
  - 1. СВ ЖБ
  - 2. СВ МК
  - 3. Пост
  - 4. Врем. длит.
  - 5. Снег. вар. 2
- 2. Динамика во времени
  - 1. Динамическая нагрузка (узловые с
  - 2. Демпфирование
  - 3. Динамическая нагрузка (правая час

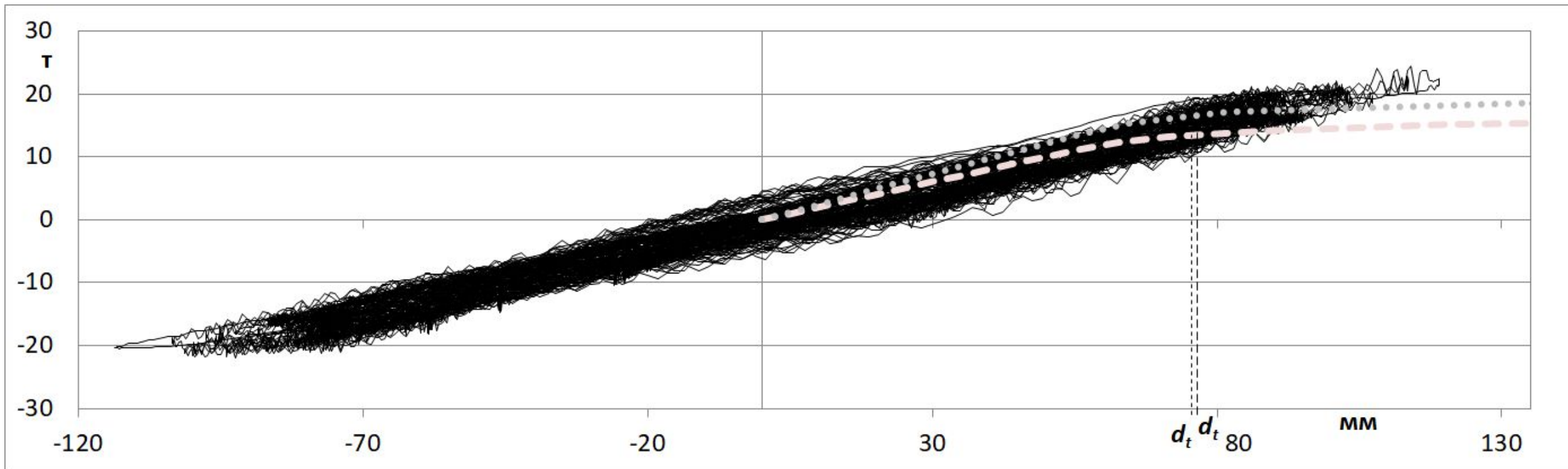


Прочитать Сохранить

Количество точек   
Шаг дискретизации, с

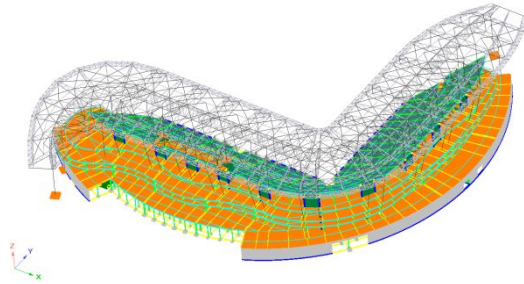
	Время, с	Кoeffи к правой
▶ 1	0	5.766
2	0.01	-11.73
3	0.02	-14.23
4	0.03	-16.73
5	0.04	-14.23
6	0.05	-14.23
7	0.06	-11.73

зависимость поперечной силы от горизонтального перемещения

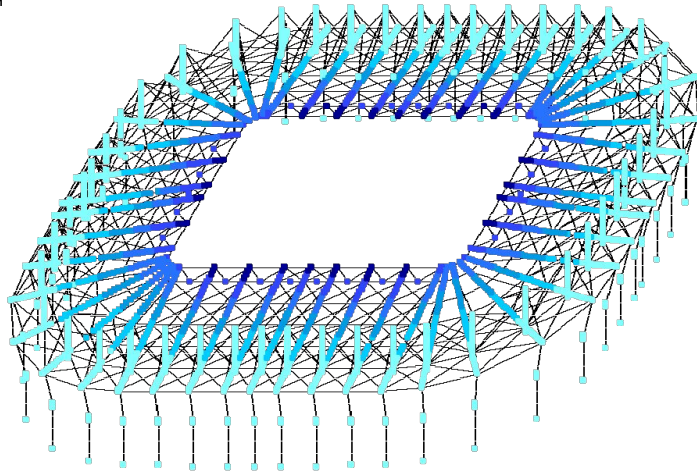
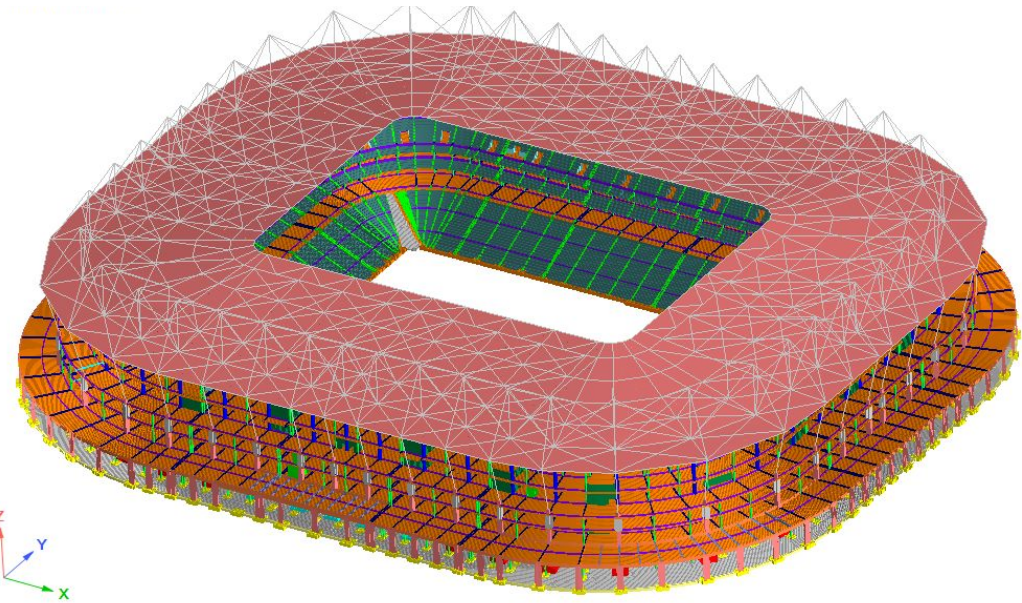




# Объекты. Стадион к ЧМ по футболу (г. Ростов-на-Дону)



- Геом. Нелинейность
- Монтаж
- Динамика +

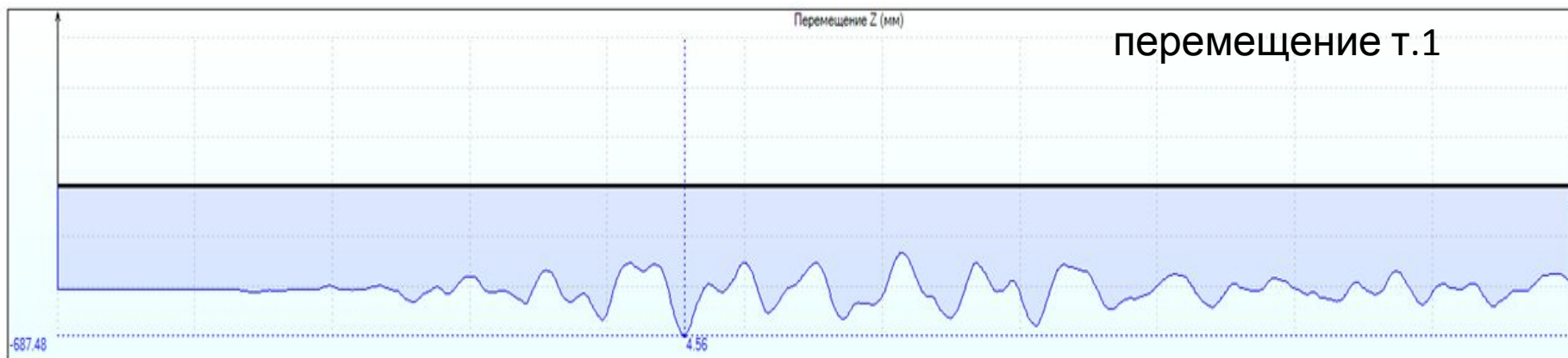
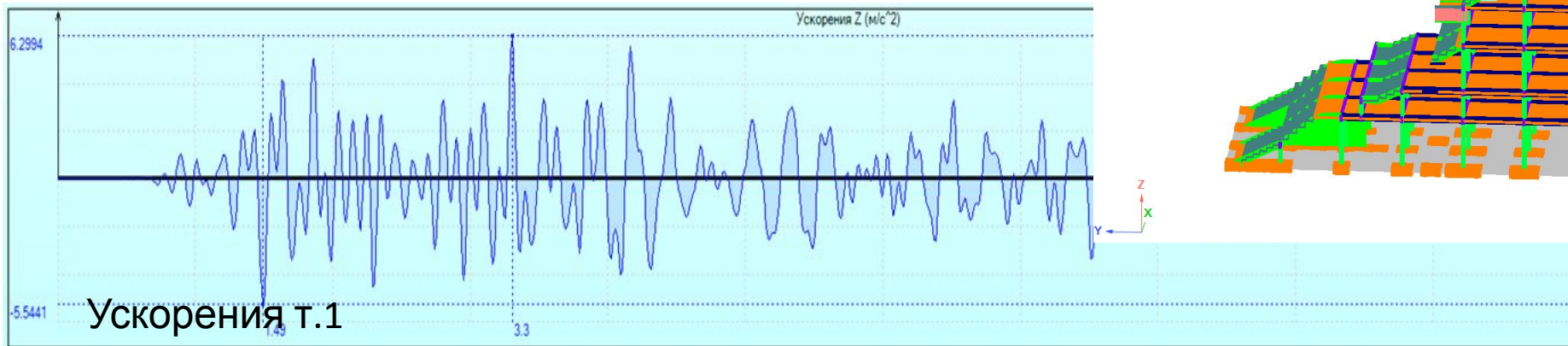
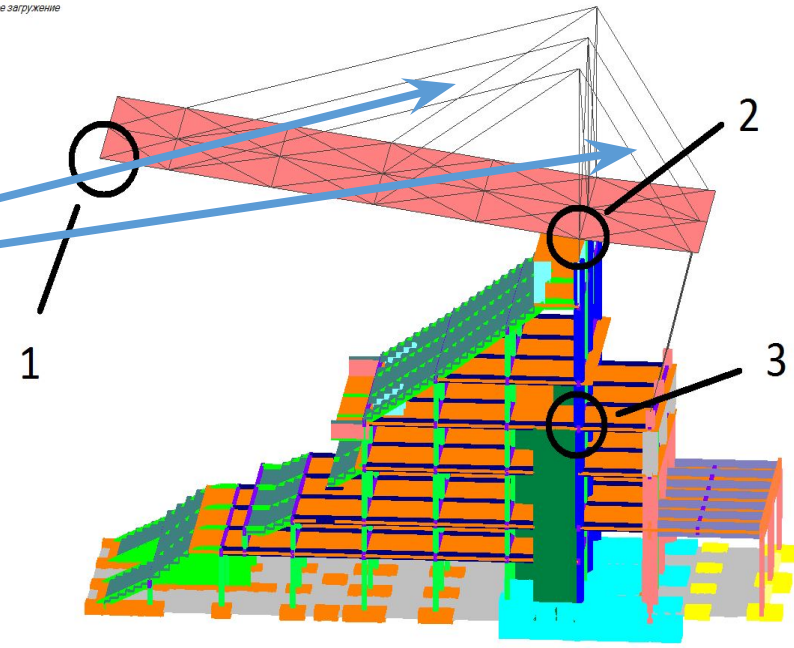


Расчетное обоснование:  
 Келасьев Н.Г. (ЦНИИПромзданий, гл. инженер)  
 Мкртычев О.В. (МГСУ, зав. НИЛ НСС)  
 Колесников А.В. (ЛИРА софт)

# Объекты. Стадион к ЧМ по футболу (г. Ростов-на-Дону)

1. Статическое нагружение

КЭ 304 Нить (геом. нелин.)





НОВАЯ ВЕРСИЯ

**ЛИРА 10.8**



**ЛИРА**  
СОФТ

# Проблемы и практические аспекты расчета больших резервуаров для хранения СПГ на особые нагрузки и воздействия ЛИРА 10.8

**Алексей Колесников**

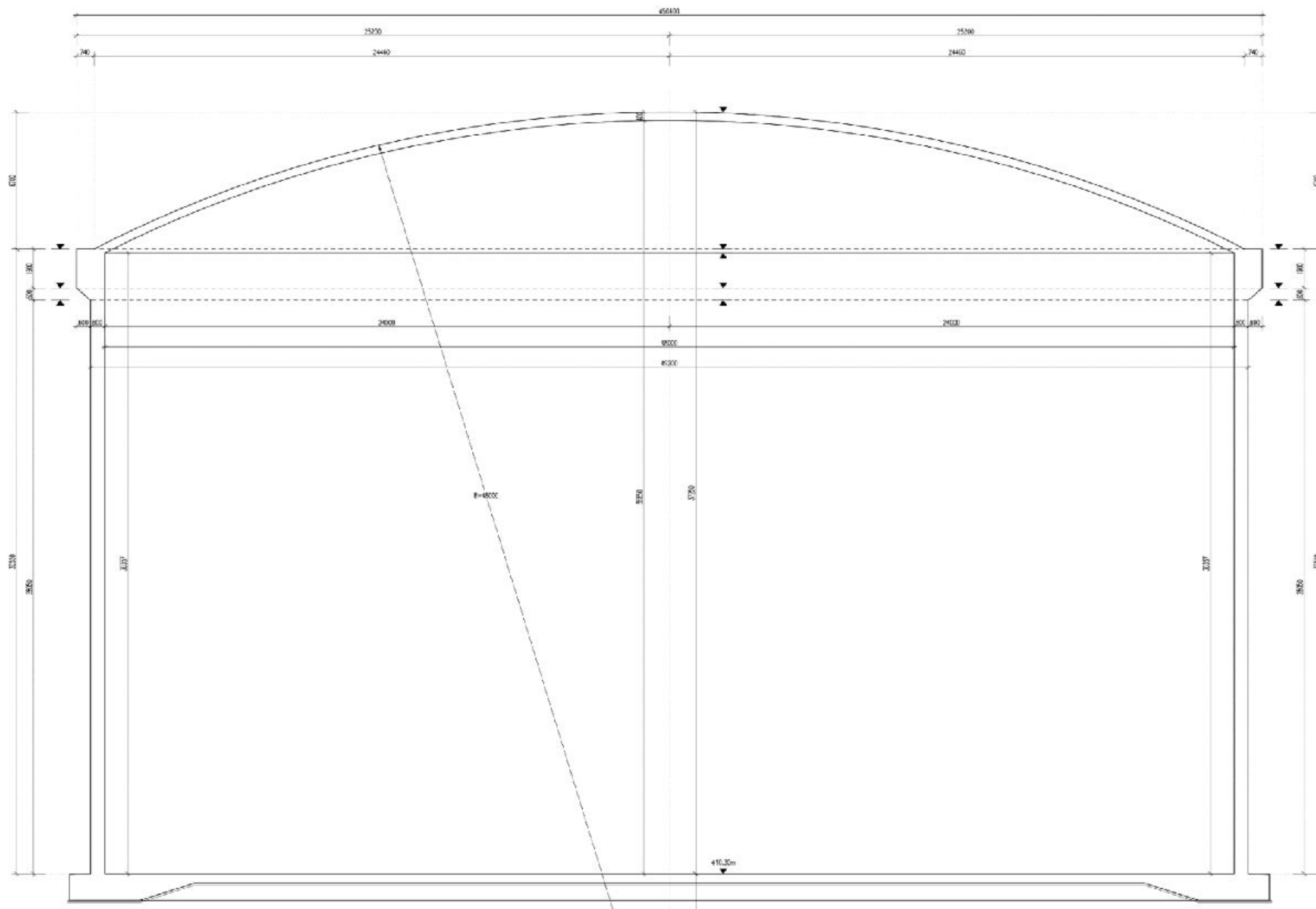
*Технический директор «ЛИРА софт»*

**Николай Келасьев**

*к.т.н., главный инженер,  
заместитель генерального директора АО  
«ЦНИИПромзданий»»*



# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕЗЕРВУАРА

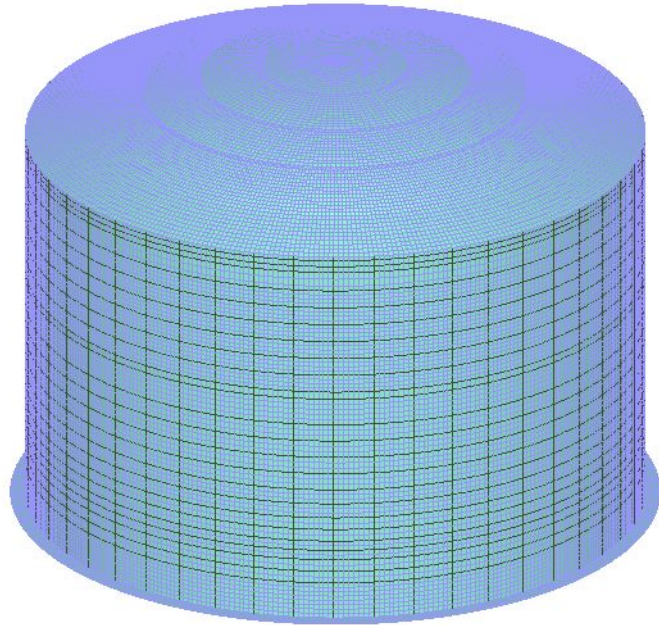


Диаметр 50 м.

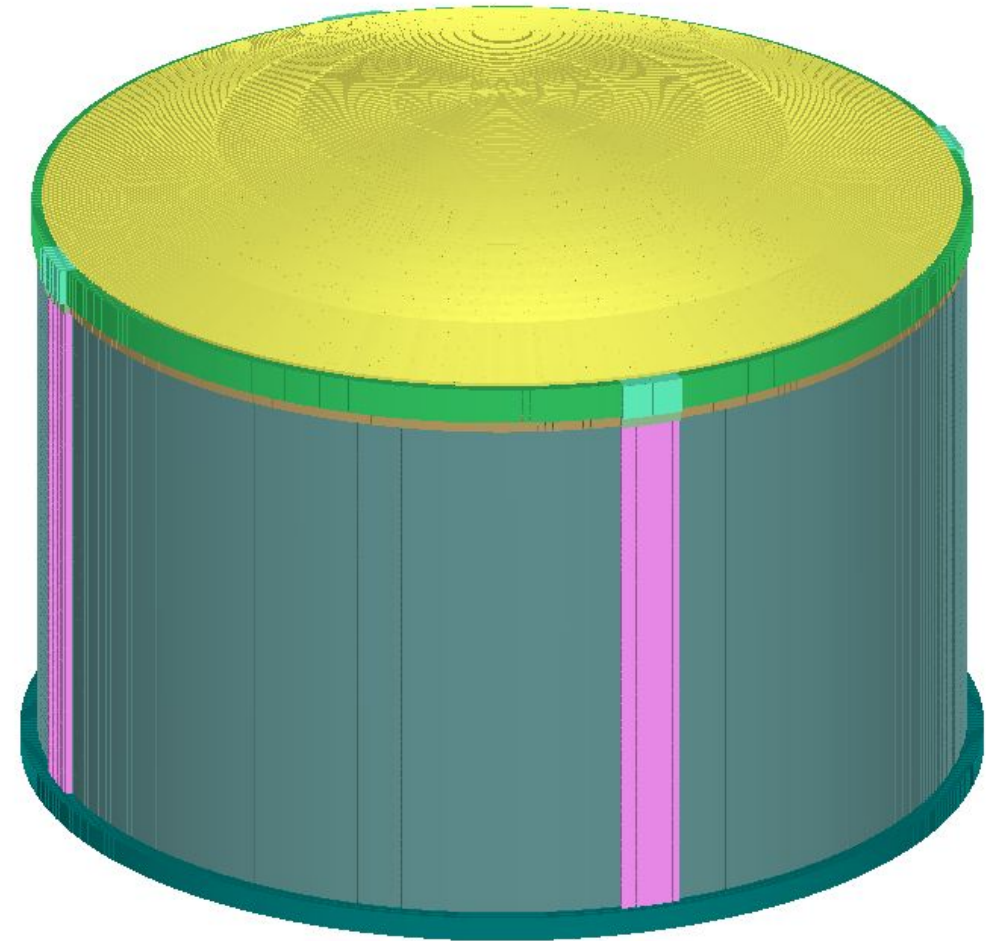
Научное  
сопровождение:  
ЦНИИПромзданий  
ЛИРА софт

# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕЗЕРВУАРА

1. Собственный вес жб



Внешние стены железобетонные толщиной 0,6 м,  
бетон класса В55, F200, W8.



Научное  
сопровождение:  
ЦНИИПромзданий

1) Постоянные, включая следующие:

- вес конструкций;
- вес теплоизоляции;
- вес стационарного оборудования;

2) Временные (длительные и кратковременные), включая следующие:

- нагрузки предварительного напряжения арматуры в стенке: кратковременные нагрузки без учета потерь преднапряжения и длительные нагрузки с учетом полных потерь;
- гидростатическое давление СПГ;
- давление паров СПГ;
- температурные нагрузки при возведении и эксплуатации;
- нагрузки на купольную крышу;
- вакуум;



- вакуум;
- давление теплоизоляции;
- ветровая нагрузка (с учётом воздействия ветра на оборудование по рекомендациям специализированных организаций);
- снеговая нагрузка с учетом возможного неравномерного ее распределения;
- воздействия от деформации основания с учетом максимальной и минимальной величин осадок основания;
- строительные нагрузки, включая строительно-монтажные нагрузки, нагрузки от оборудования, рабочей силы, нагрузку от незатвердевшего бетона при использовании облицовки внешней крыши в качестве опалубки, а также ветровые и снеговые нагрузки. Ветровые и снеговые нагрузки при строительстве следует принимать на 20 % меньше, чем эти же нагрузки на стадии эксплуатации;
- нагрузки при испытаниях (от гидро- и пневмоиспытаний);

## Аварийные ситуации:

- утечка продукта из внутреннего резервуара;
- пожар на предохранительном клапане;
- ударная нагрузка от летящих объектов: от предмета весом 50 кг, летящего со скоростью 45 м/с, и от предмета весом 4000 кг, падающего с высоты 10 м;
- взрывные воздействия от соседних объектов – 28 кПа;
- тепловой поток от пожара на соседнем объекте;
- разлив СПГ из внутреннего резервуара.

Таблица 4.4. Таблица сочетаний.

Категории сочетания нагрузок	Постоянная нагрузка	Предварительное напряжение	Усадка бетона	Температурные воздействия при эксплуатации	Испытательная среда при гидротиптании	Испытательное давление (вакуум)	Расчетная нагрузка от продукта	Расчетное давление	Расчетный вакуум	Временные нагрузки на крышу	Снеговая нагрузка	Ветровая нагрузка	Нагрузки при утечке продукта из внутреннего резервуара	Тепловые нагрузки при пожаре на свече сброса давления	Взрывные нагрузки
Завершение строительства	X	X	--	--	--	--	--	-	--	X	X	--	--	--	--
Техническое обслуживание	X	X	X	--	--	--	--	--	--	X	X	--	--	--	--
Испытание	X	X	--	--	X	X	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Эксплуатация (пустой)	X	X		X	--	--	--	X	X	X	X	--	--	--	--
Эксплуатация (полный)	X	X	X	X	--	--	X	X	X	X	X	--	--	--	--
Эксплуатация + ветер	X	X	X	X	--	--	X	X	X	X	X	X	--	--	--
Утечка (все уровни)	X	X	X	X	--	--	--	X	--	--	--	--	X	--	--
Пожар клапана сброса давления	X	X	X	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	X	--
Эксплуатация (пустой) + взрыв	X	X	X	X	--	--	--	X	--	X	--	--	--	--	X
Эксплуатация (полный) + взрыв	X	X	X	X	--	--	X	X	--	X	--	--	--	--	X

#### Примечания

1 Нагрузки, используемые в сочетаниях, обозначаются символом «X».

2 В таблице определяются общие требования к нагрузкам, которые необходимо учитывать при составлении сочетаний нагрузок по каждой категории воздействий. Конструкции резервуара для хранения СПГ рассчитываются на наиболее неблагоприятные сочетания нагрузок, возникающих в результате сочетания особых нагрузок. Расчетные комбинации дополнительных нагрузок, указанных в таблице, определяются при проектировании на основании исходных данных для проектирования.

3 Для каждого случая некомбинированных нагрузок только единичная аварийная нагрузка должна рассматриваться в сочетании с необходимой нормальной нагрузкой.



# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕЗЕРВУАРА

17.1. Средняя составляющая ветрового воздействия

Ветровой район – II.

Тип местности – А.

$$w_m = w_0 k(z_e) c;$$

$$w_0 = 0,3 \text{ кПа};$$

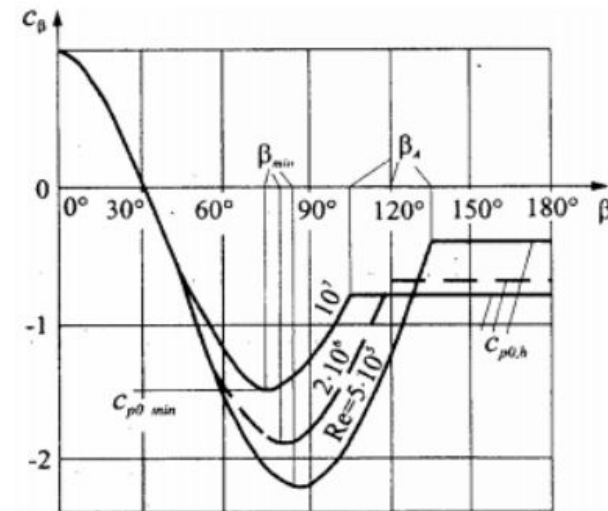
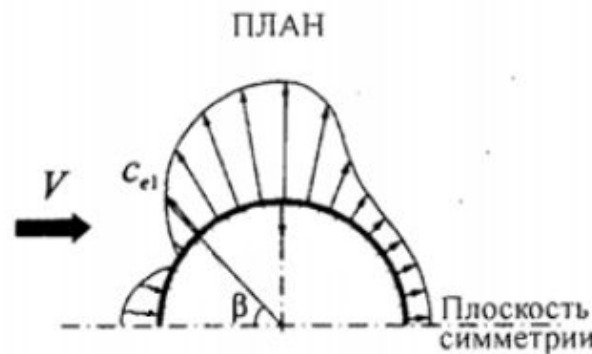
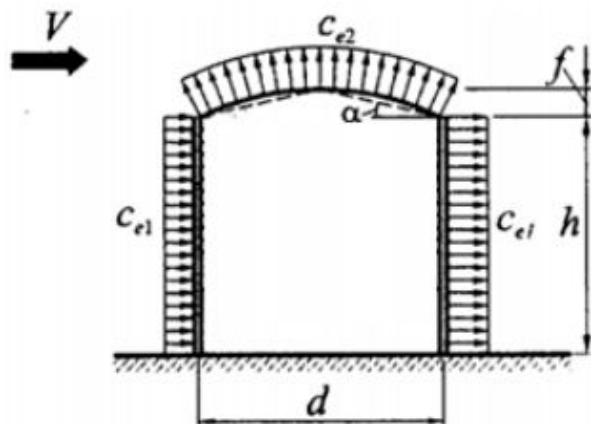
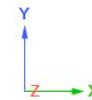
$k(z_e)$  – коэффициент, учитывающий изменение давления ветра по высоте, определяется по п.11.1.6[1];

$$k_{10} = 1; \alpha = 0,15.$$

Аэродинамический коэффициент внешнего давления  $c_{e1}$  (рисунок 4.3) определяется по формуле:

$$c_{e1} = k * c_{\beta}$$

где  $k = 1$  при  $c_{\beta} > 0$  и  $k = 0,6$  при  $c_{\beta} < 0$ .

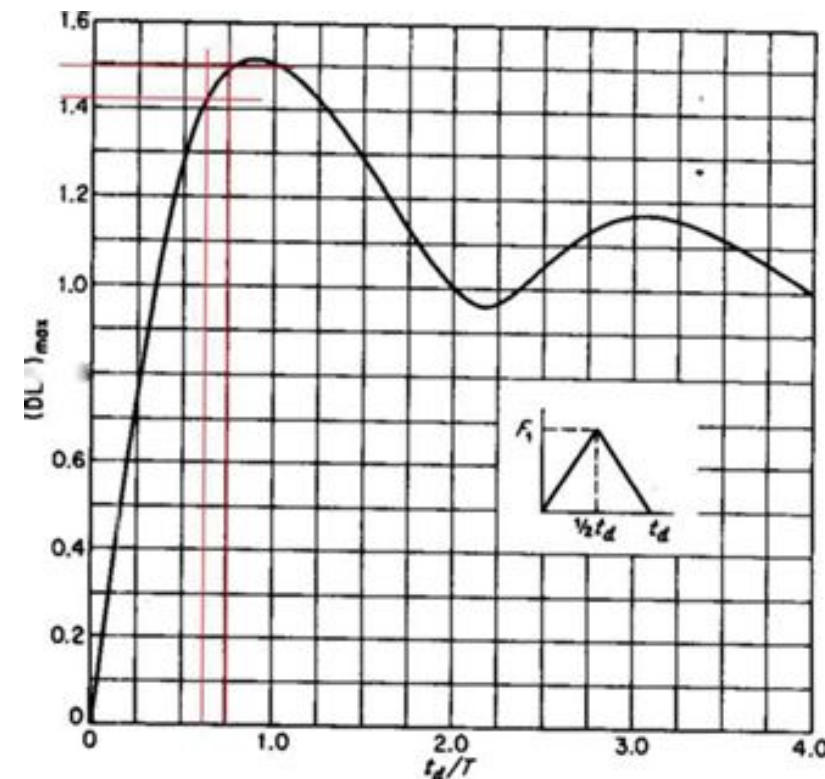


Научное  
сопровождение:  
ЦНИИПромзданий  
ЛИРА софт

## 4.2.1. Ударная волна

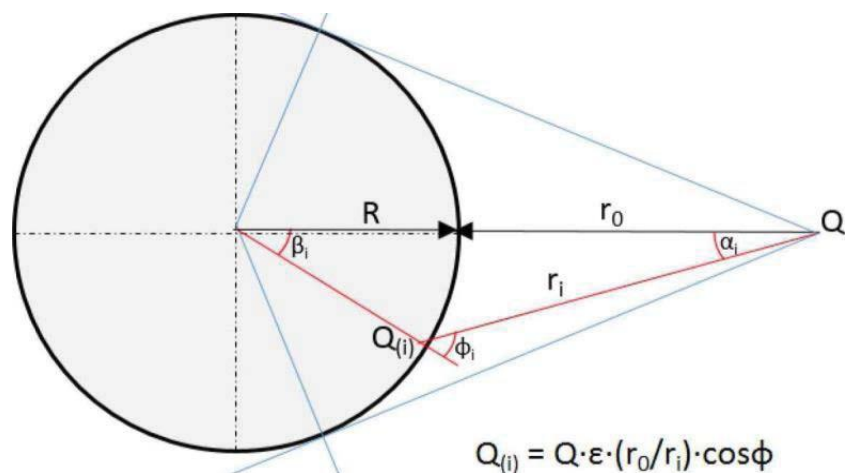
Резервуар СПГ 73D01 расположен во взрывной зоне с манометрическим давлением в 28 кПа. Продолжительность фазы сжатия дается в 0.135 с, продолжительность отраженной волны давления дается в 0.035 с.

Первые четыре собственные частоты колебаний установлены для двух расчетных вариантов нагрузки. Первый расчетный вариант нагрузки – рассматривается для пустого резервуара с собственным весом бетонных частей, с постоянной нагрузкой от внутреннего содержимого и постоянной нагрузкой от платформы. Второй расчетный вариант - нагрузки, рассматриваемые для заполненного резервуара, которые включают те же нагрузки, что и для пустого резервуара, с добавленными нагрузками от СПГ.



## 4.2.3. Тепловое излучение

Тепловое излучение, согласно [10, 12], принято равным  $32 \text{ кВт/м}^2$  для 30 минут на расстоянии в 15 м. Учитывая расстояние, угол и коэффициент излучения источника тепла, может быть рассчитано излучение на внешнюю поверхность бетонной стенки. Ниже представлен принцип расчета и зависимость между расстоянием и углом:



$$Q_{(i)} = Q \cdot \varepsilon \cdot (r_0/r_i) \cos \phi \quad \text{интенсивность излучения на поверхность}$$

$Q$  излучение источника

$\varepsilon$  коэффициент излучения источника

$r_0$  вертикальное расстояние источника излучения

$r_i$  расстояние до источника излучения

$\cos \phi$  угол распространения излучения

На поверхностях, подверженных воздействию огня, поток чистого тепла может быть рассчитан в соответствии с [12] следующим образом:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

Чистый конвективный тепловой поток может быть рассчитан следующим образом:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m)$$

$\alpha_c$  коэффициент передачи тепла при соединении

$\theta_g$  температура газа вблизи части, подверженной действию элемента

$\theta_m$  температура поверхности элемента



# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕЗЕРВУАРА

Чтобы учесть рассчитанную температуру в МКЭ-модели, поверхность разделена на сегменты по 4 м с углом  $P_i = 10^\circ$ . Суммарный угол излучения источника равен  $102^\circ$ , таким образом, разделение на части по  $10^\circ$  представляется разумным [12]. Для зимнего времени, когда рассчитаны значительно более низкие температуры, расчет с такими температурами не требуется.

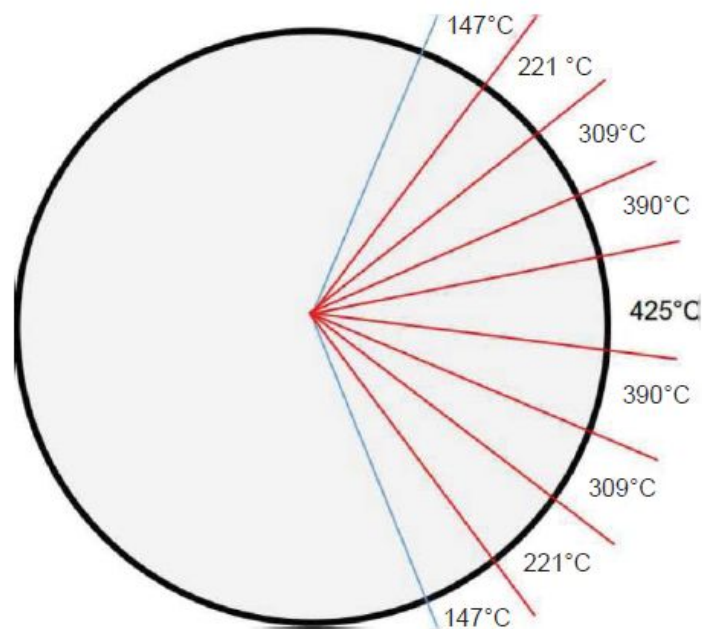
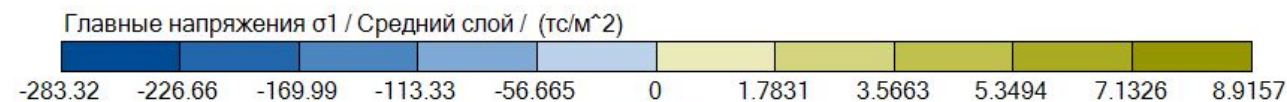
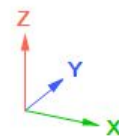
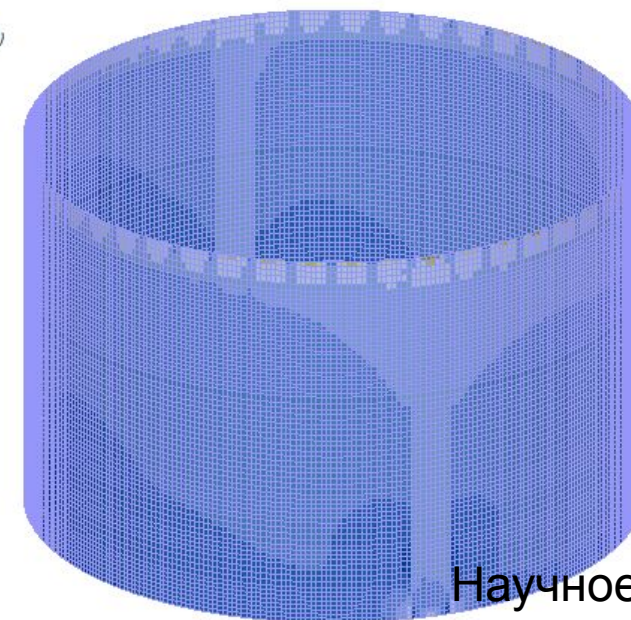


Рис. 4.9 Температура поверхности стенки в летнее время



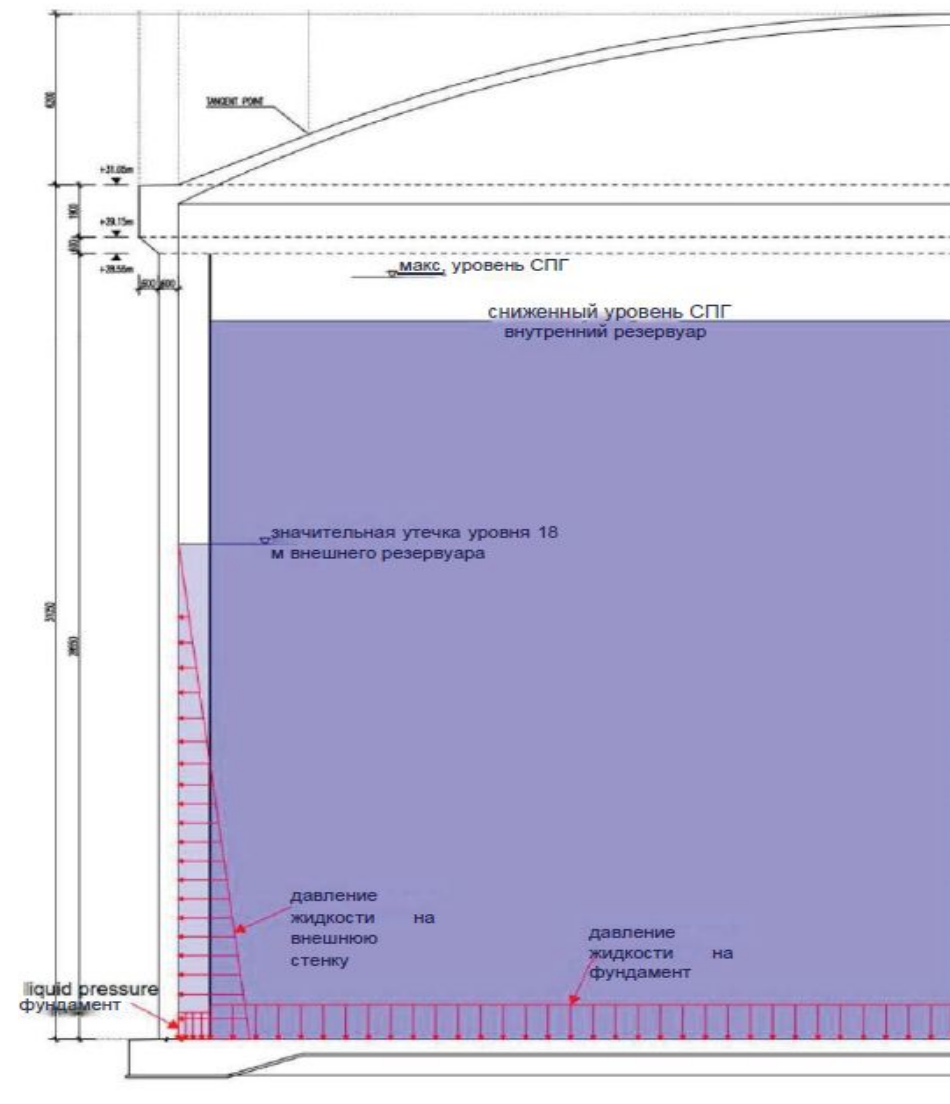
1. Сочетание "Эксплуатационное 1"  
min=-283.3 (13800); max=8.916 (23599)  
PCH



Научное  
сопровождение:  
ЦНИИПромзданий

## 4.2.4. Сильная утечка

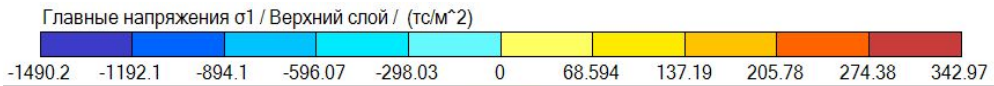
В случае повреждения внутренней части резервуара, внутренняя поверхность бетонной стенки будет находиться в контакте с СПГ. Таким образом, бетонная стенка должна выдерживать расчетную температуру в минус 170 °С, как указано в документе технического регламента №&AA-B-SX 7301.001 выпуск 0.2, 06.09.2016 [10] и НТС [12]. В этом случае приоритетом бетонной конструкции является обеспечение газонепроницаемости на срок до четырех дней. Чтобы обеспечить непроницаемость бетона в случае отказа внутреннего резервуара, в зоне остаточного сжатия должна быть область сжатия в 100 мм и среднее напряжение от остаточного давления в  $1 \text{ Н/мм}^2$ .



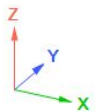
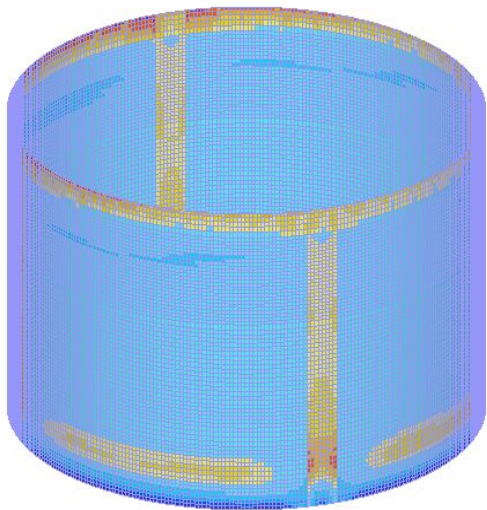
Научное  
сопровождение:  
ЦНИИПромзданий



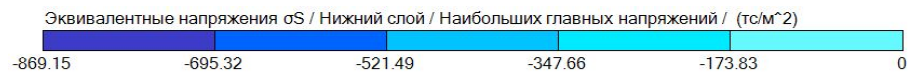
## 4.2.4. Сильная утечка



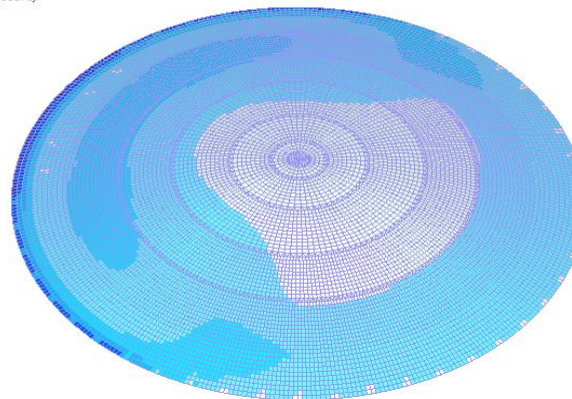
11. Сочетание "Гидроиспытания"  
min=-1490 (1942); max=343 (13505)  
PCH



- В задаче будут присутствовать нелинейные элементы
- В задаче будет использоваться система « МОНТАЖ »
- В задаче будет использоваться система « ДИНАМИКА + »
- В задаче будет использоваться система « МОСТ »
- В задаче будет использоваться система « PUSHOVER »
- Определение упруго-геометрических характеристик композитного поперечного сечения стержня (система « СЕЧЕНИЕ »)
- Задача расчета температурного поля (система « ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ »)
- Задача моделирования фильтрации в насыщенном влагой грунте (система « ФИЛЬТРАЦИЯ »)



14. Сочетание "Раслив 25.5"  
min=-869.2 (55532); max=0 (50876)  
PCH





## 4.2.5. Эквивалентная статическая взрывная нагрузка

Расчет давления ударной волны на внешний корпус резервуара.

Скорость фронта ударной волны выражается формулой [12]:

$$U = C_0 \left( 1 + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \right),$$

где  $C_0$  – скорость звука в воздухе  $C_0 = 331$  м/с;

$\Delta p$  – максимальное избыточное давление во фронте падающей ударной волны, в данном случае  $\Delta p = 0,15$  бар – 0,5 заданного давления в отраженной волне;

$p_0$  – давление окружающей среды (перед фронтом ударной волны), в данном случае  $p_0 = 1$  бар;

$\gamma$  – показатель адиабаты - отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме. Для воздуха  $\gamma = 1,4$ .

$U = 1,12C_0 = 470$  м/с. От передней точки цилиндра до задней точки фронт ударной волны проходит за 0,14 сек, т.е. за время в 1,4 раза большее, чем время действия импульса давления.

Скорость воздуха за фронтом ударной волны  $u$  равняется

$$u = \frac{5p}{7p_0} \cdot \frac{C_0}{\sqrt{1+6p/7p_0}}$$

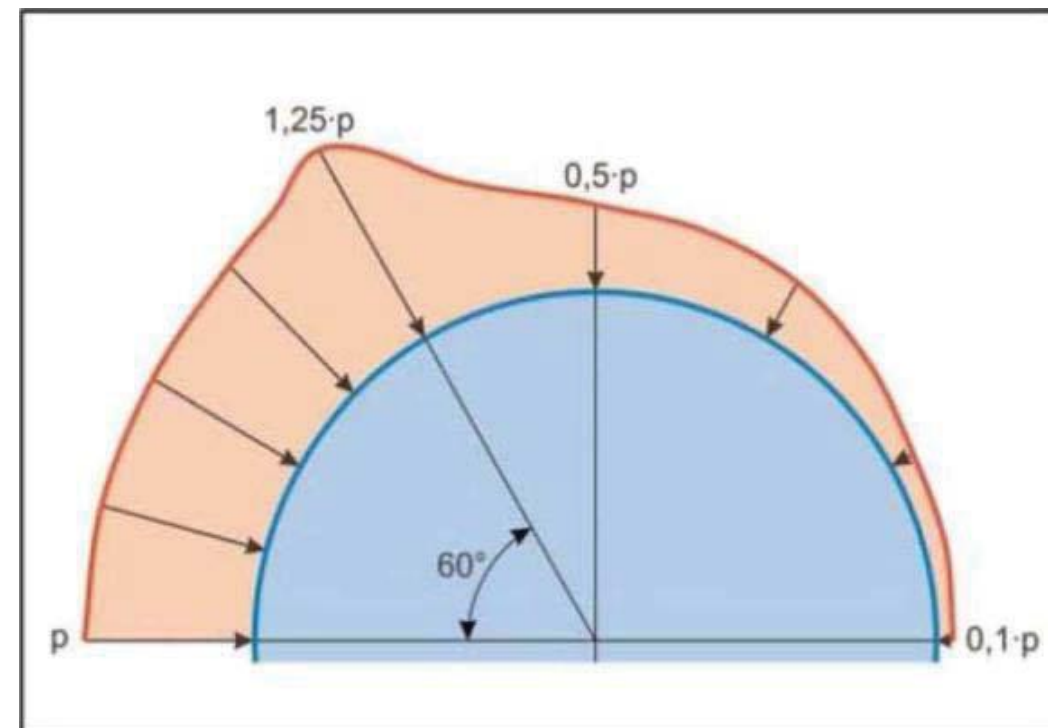
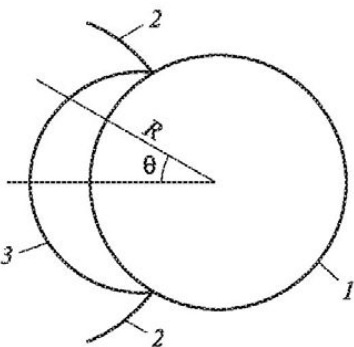
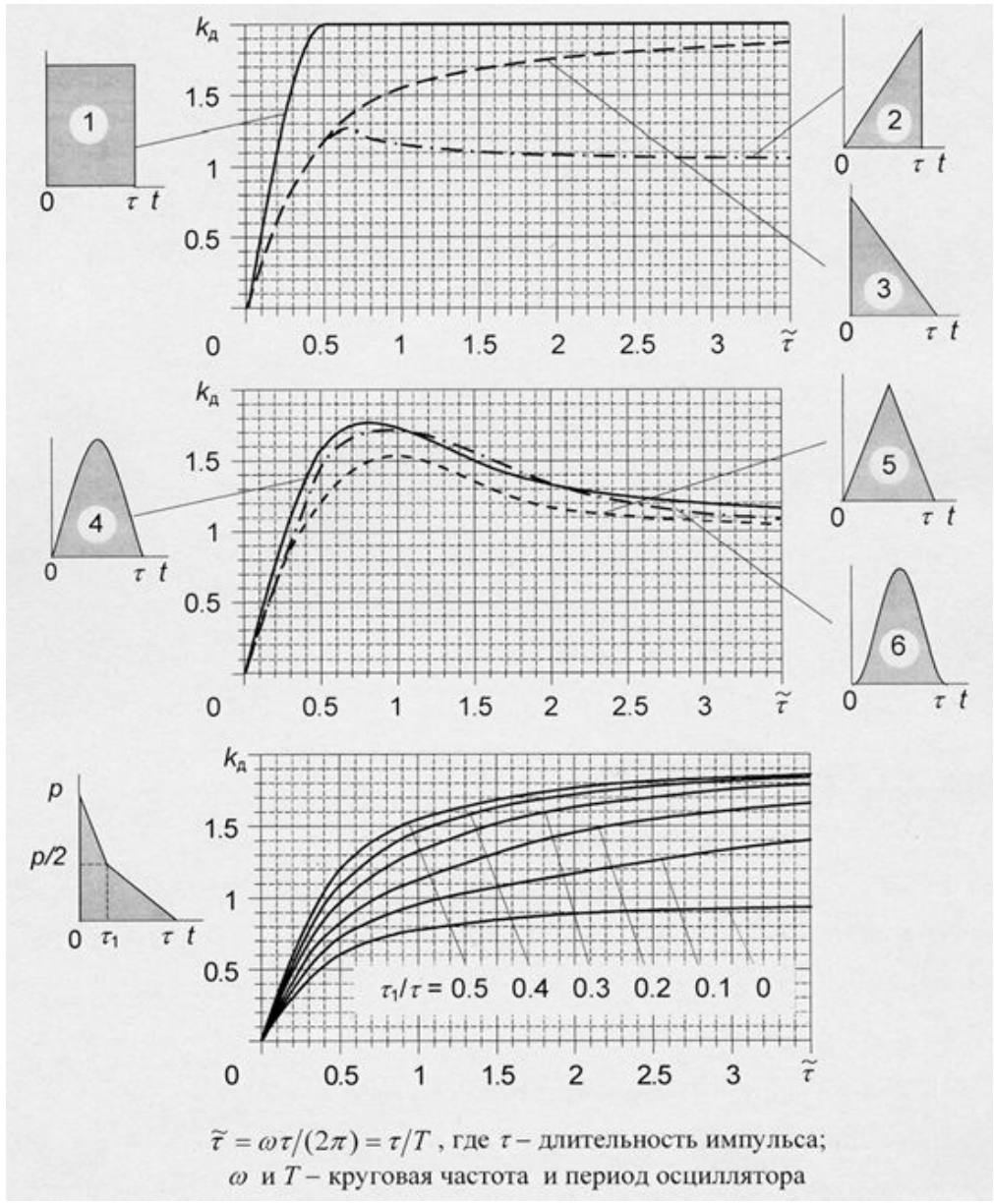


Рис. 4.11. Эквивалентная статическая нагрузка

# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕЗЕРВУАРА



Давление на поверхность цилиндра, одинаковое по высоте, рассчитывается по формуле

$$P(\varphi) = k_d C_p(\varphi) \cdot P_0,$$

где  $k_d$  – коэффициент динамичности,  $P_0$  – давление в падающей волне,  $P_0 = 0,15$  бар.

17.1. Форма 1  
Частота: 23.789 (Rad/c)

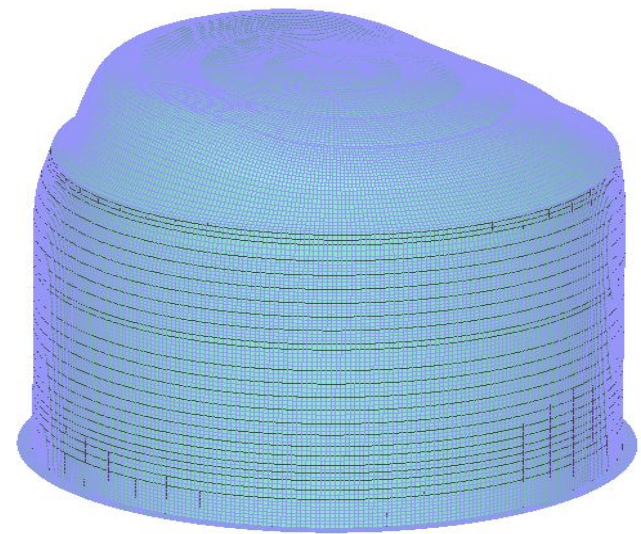
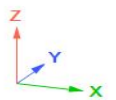


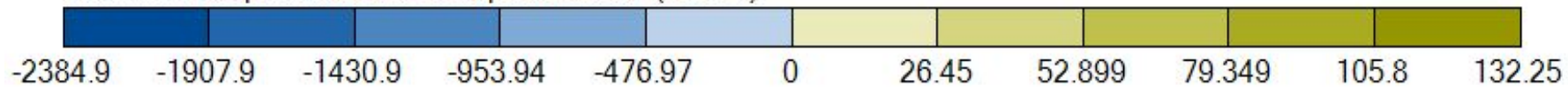
Рис. 4.15 Коэффициенты динамичности при действии импульсов различной формы

Научное  
сопровождение:  
ЦНИИПромзданий

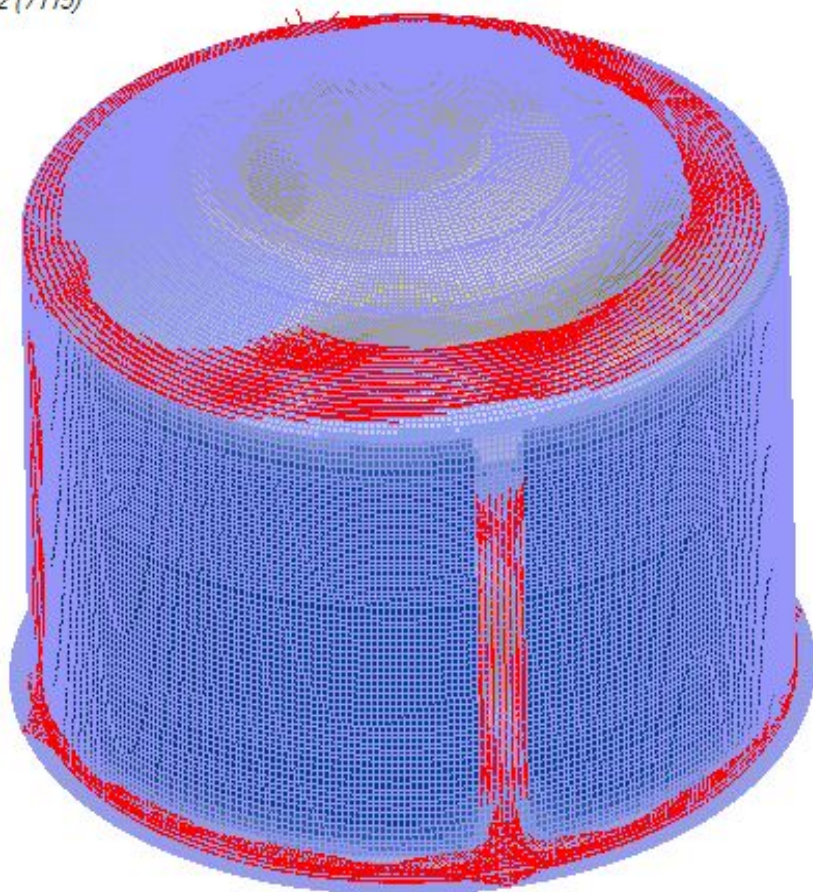


# РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕЗЕРВУАРА

Главные напряжения  $\sigma_3$  / 3-Верхний Слой (тс/м<sup>2</sup>)

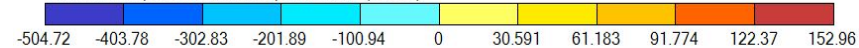


1.1.. Все  
min=-2385 (18112); max=132.2 (7115)

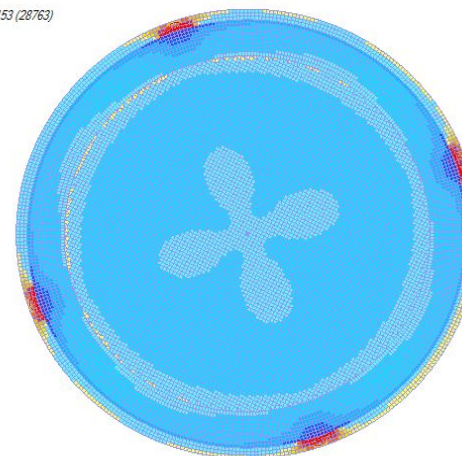


Результаты моделирования с учетом физической и геометрической нелинейности при поэтапном возведении и **преднапряжения** при проектной арматуре.

Главные напряжения  $\sigma_1$  / 3-Верхний Слой (тс/м<sup>2</sup>)



1.1.. Все  
min=-504.7 (31112); max=153 (28763)



Научное сопровождение:  
ЦНИИПромзданий



# Мечеть имени пророка Мухаммада в г. Махачкала: Особенности проектирования и расчета на внешние воздействия.

**Алексей Колесников**

*Технический директор «ЛИРА софт»*

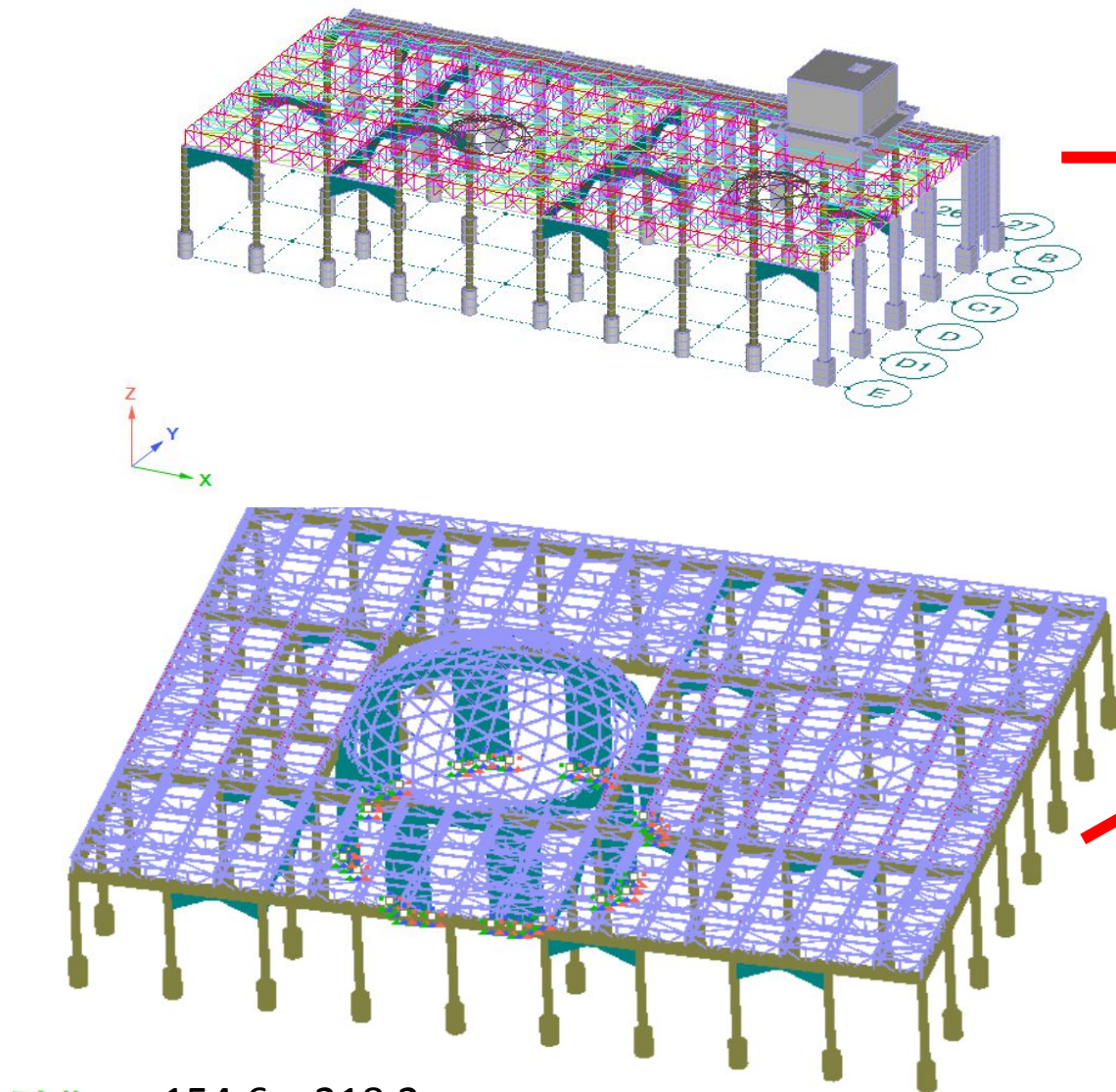
**Арсен Сулейманов**

*Главный инженер ООО «Компания Авилон»*

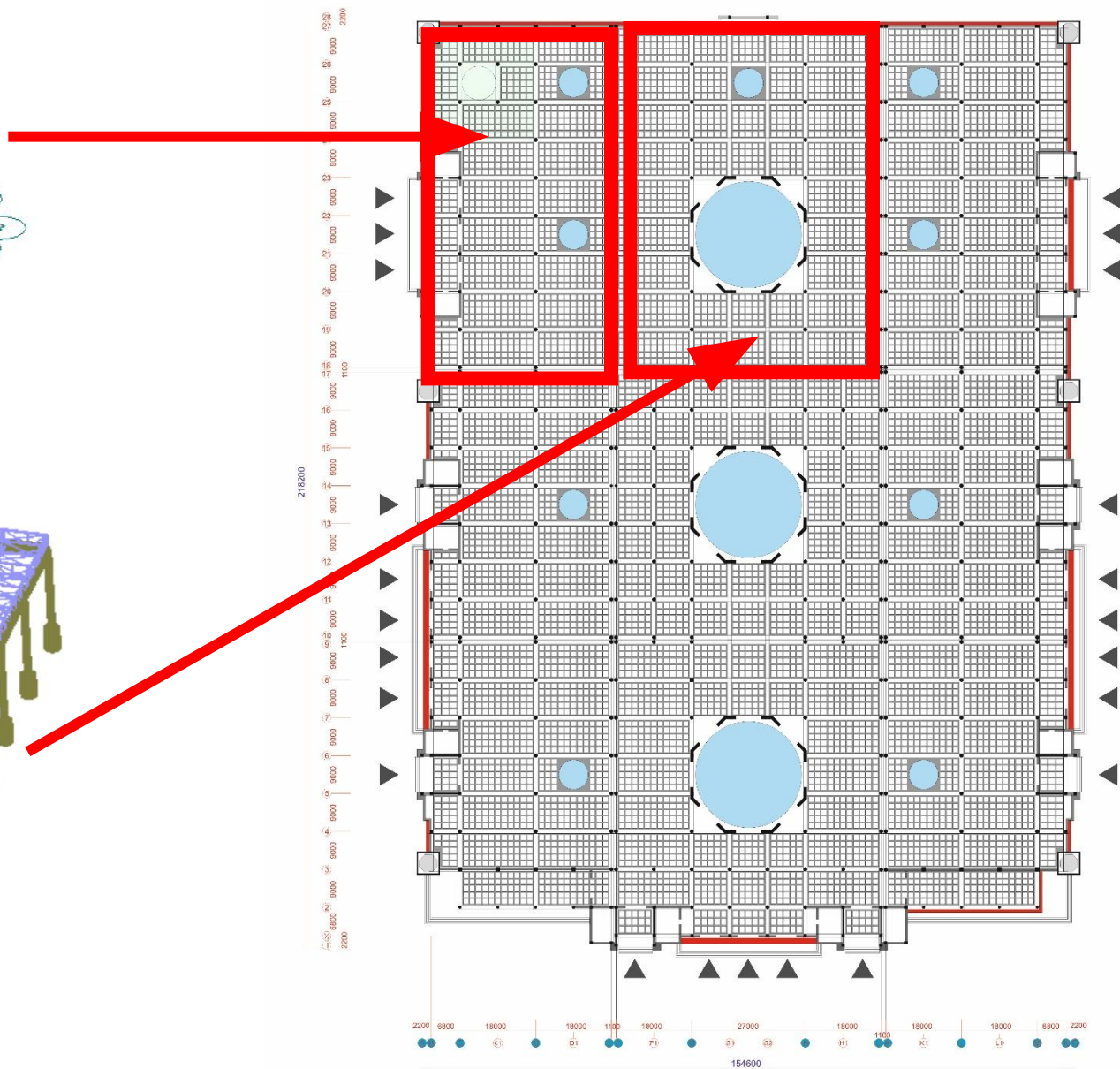


# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ

1.с

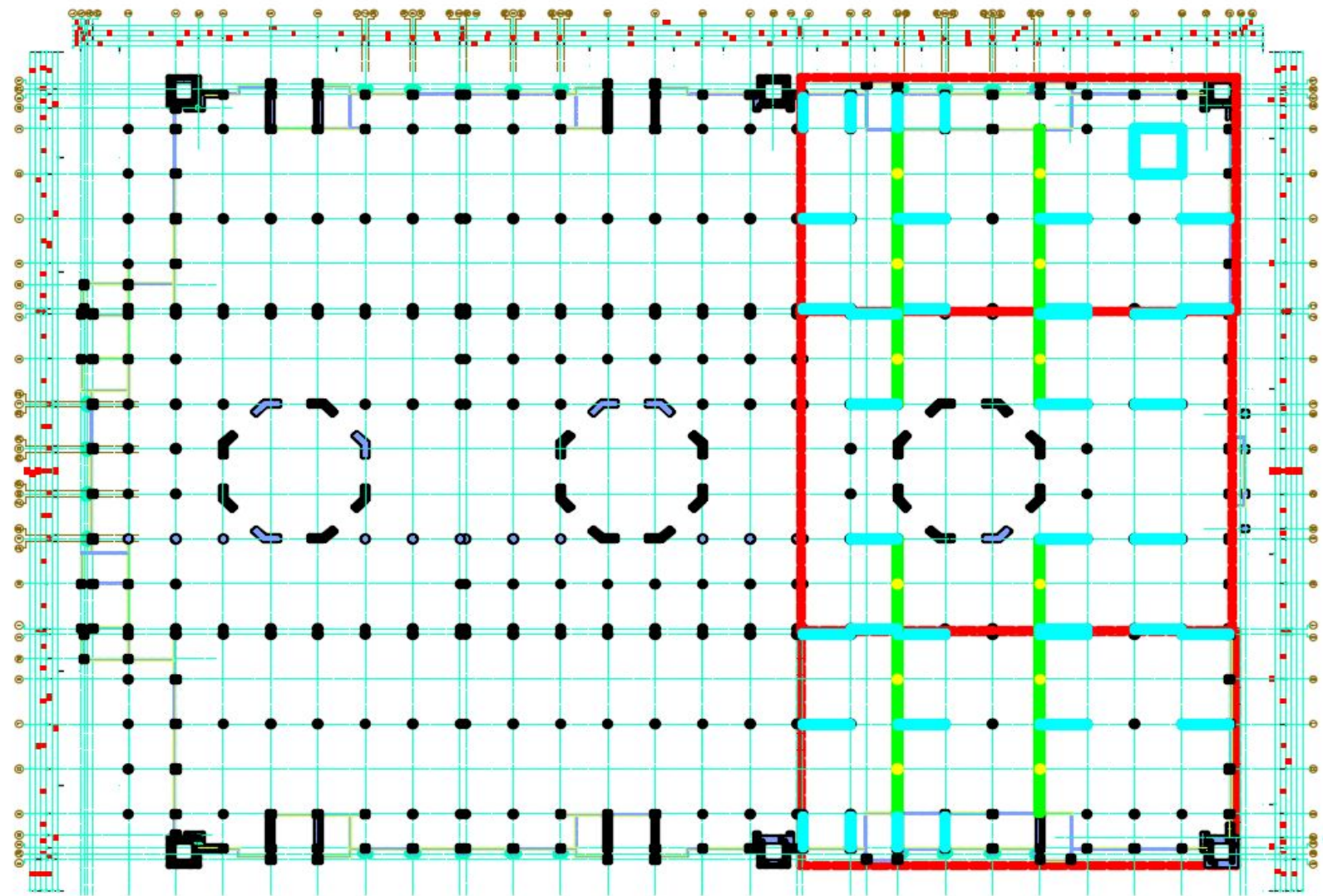
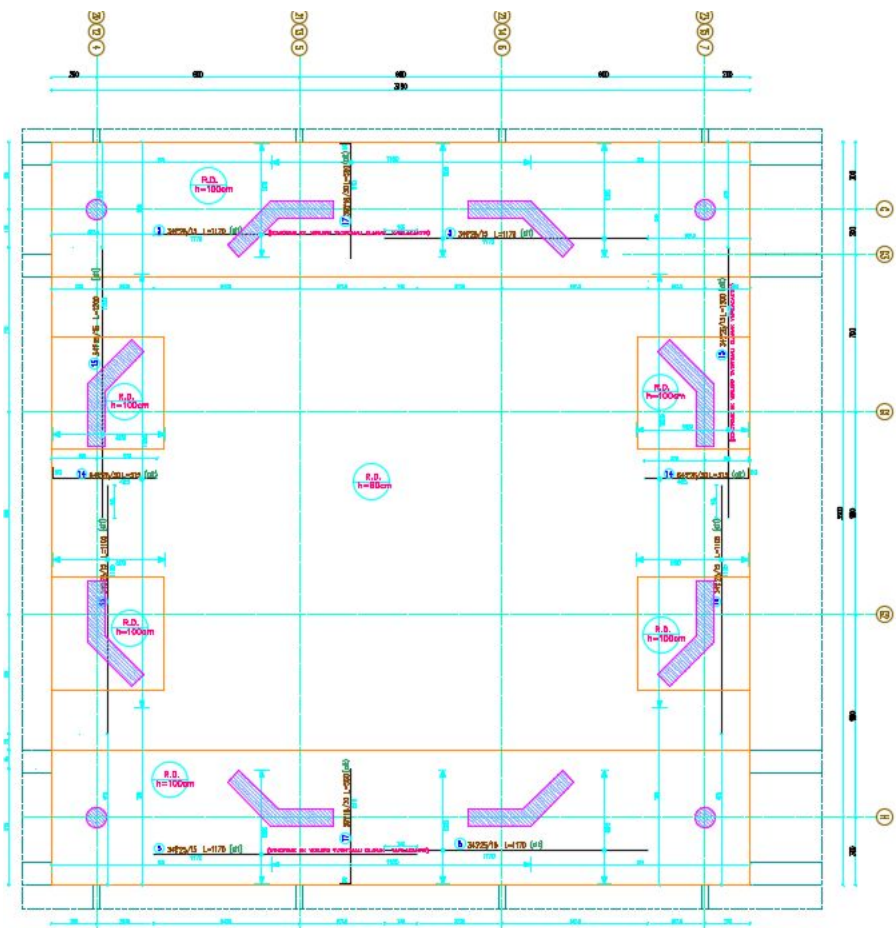


154.6 x 218.2 м.  
Объект разделен швами на 9 блоков





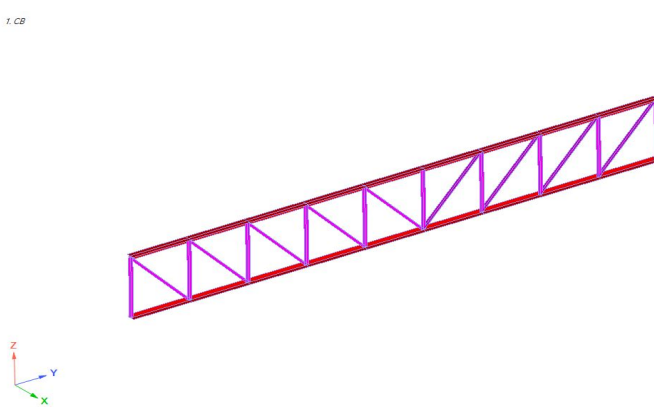
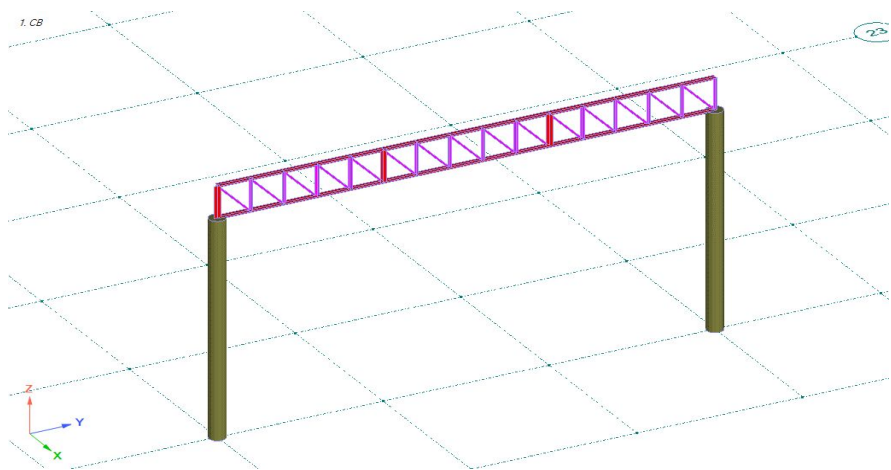
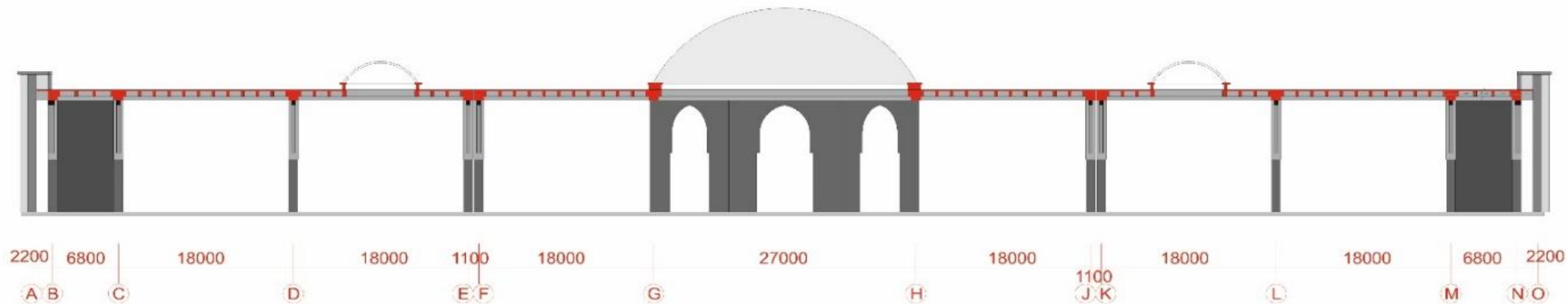
# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ



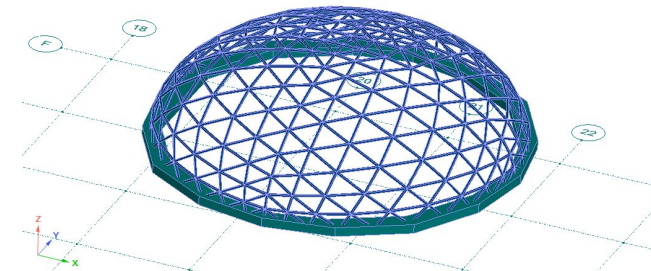


# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ

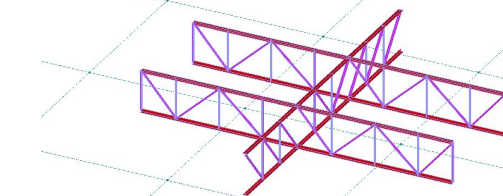
Разрез по оси 20



1. CB

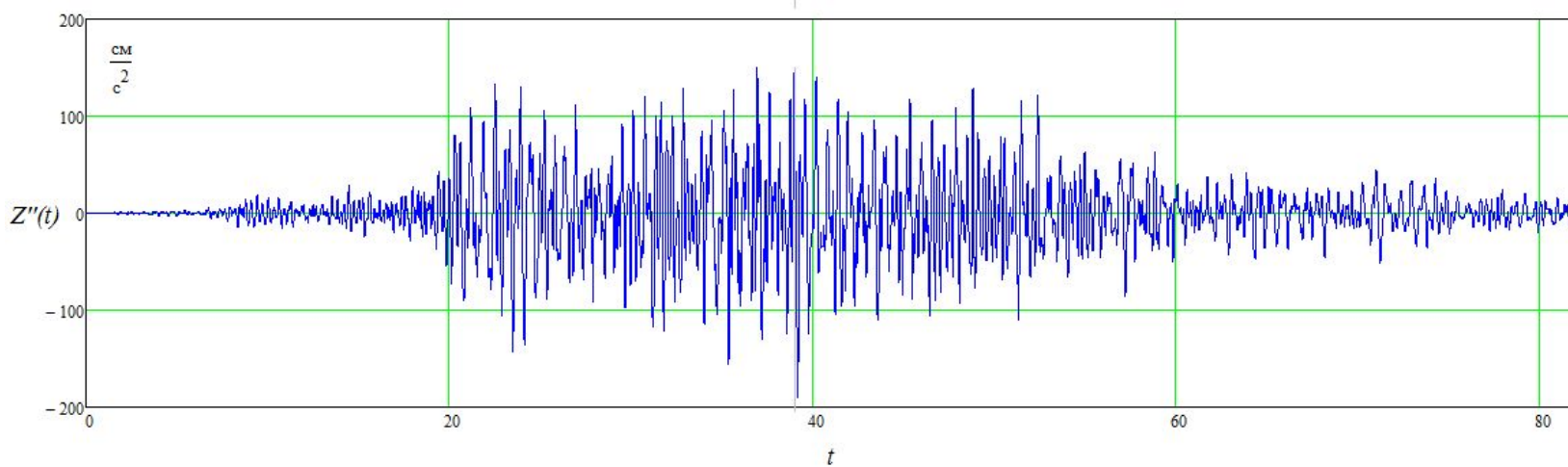
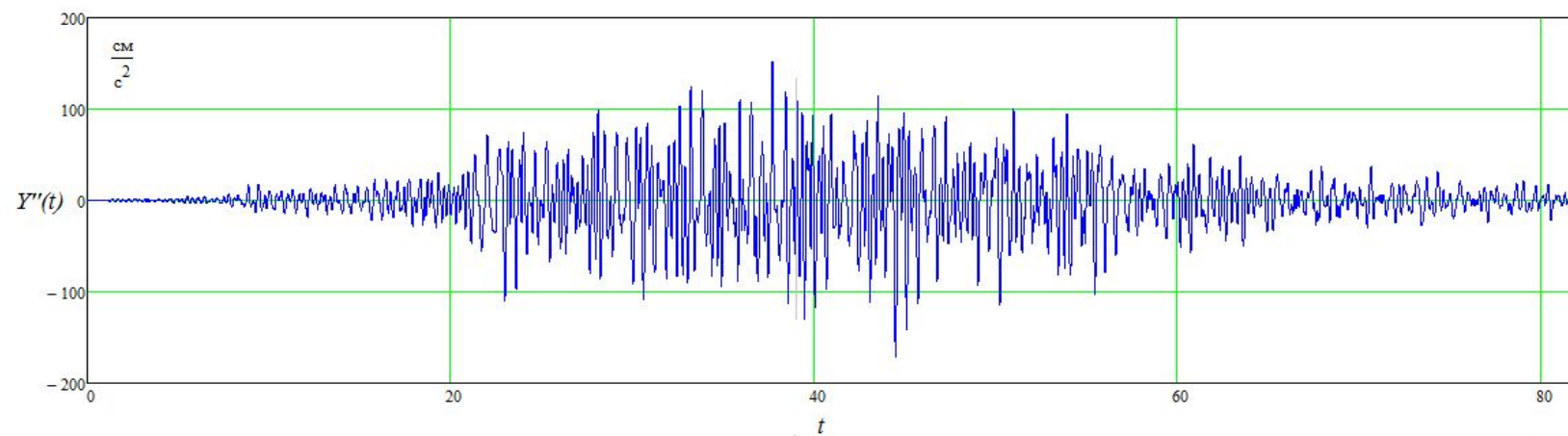
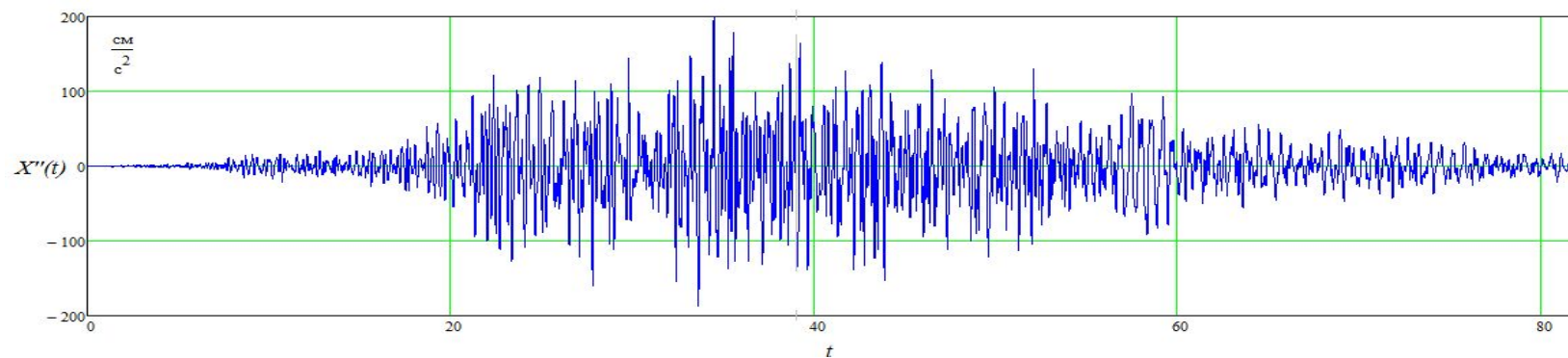


1. CB



1. CB

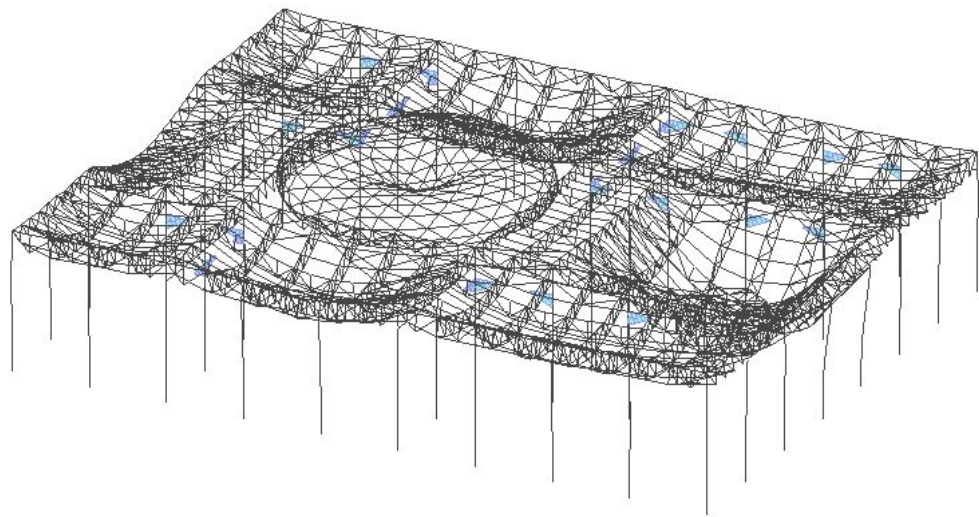
# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ



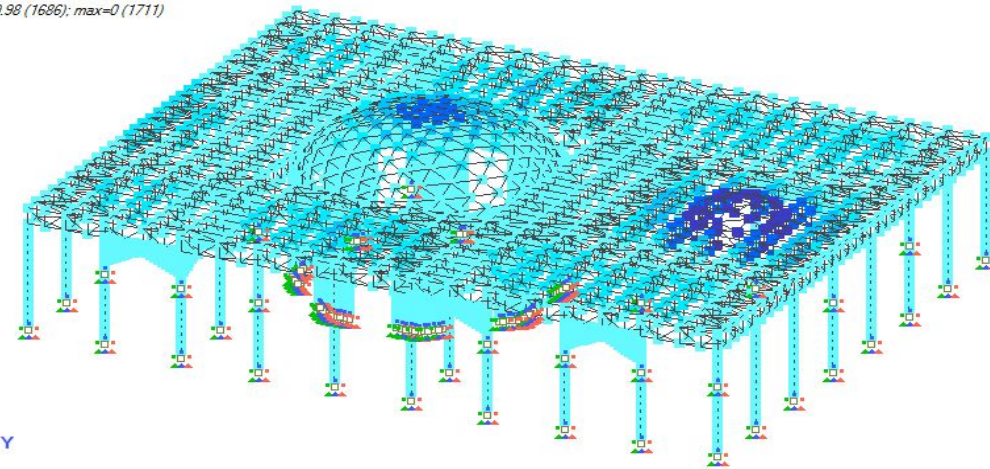


# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ

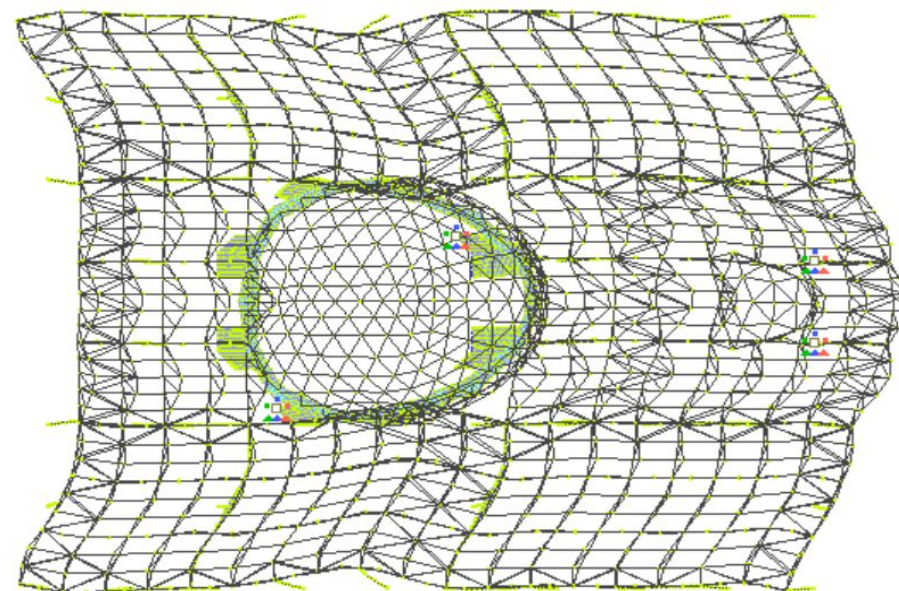
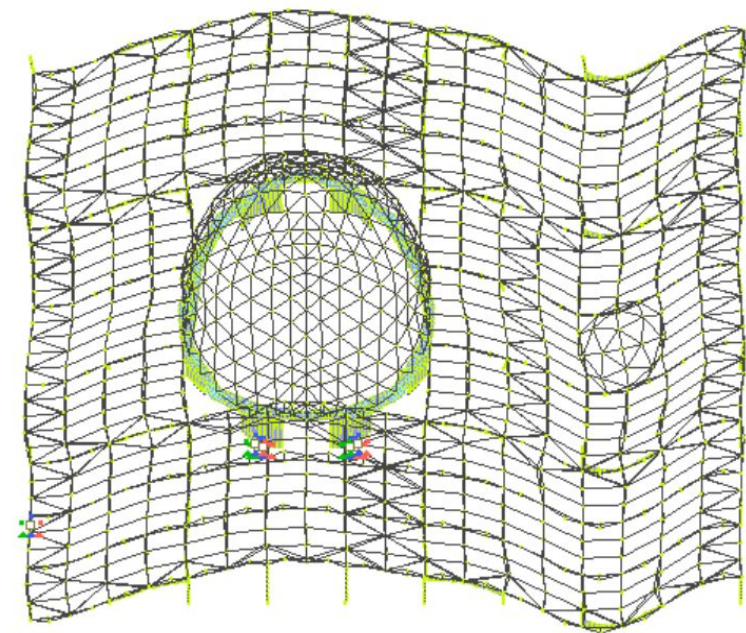
1. Сочетание "Основное сочетание"



1. Сочетание "Основное сочетание"  
min=-49.98 (1686); max=0 (1711)  
PCH



Z

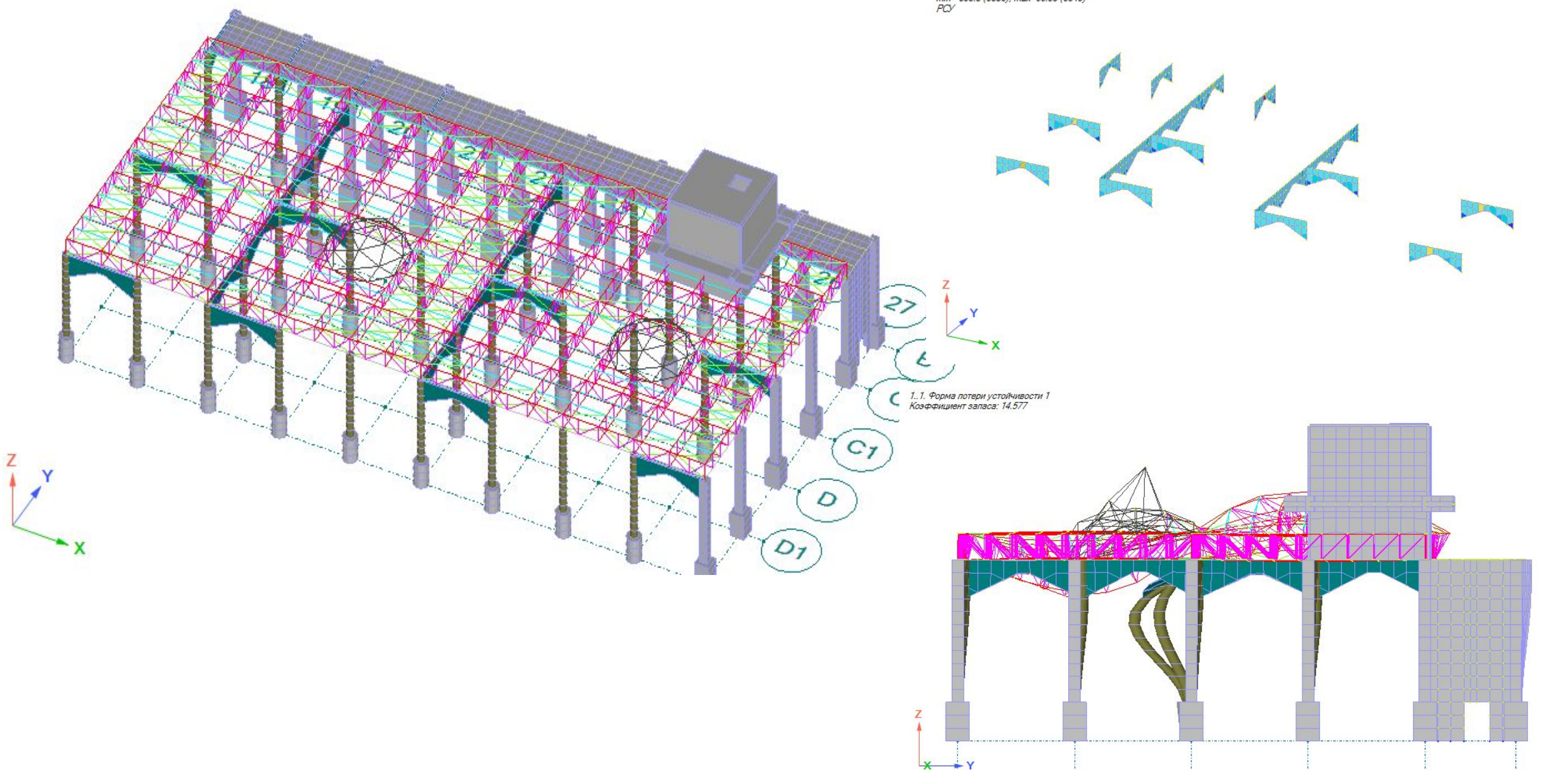
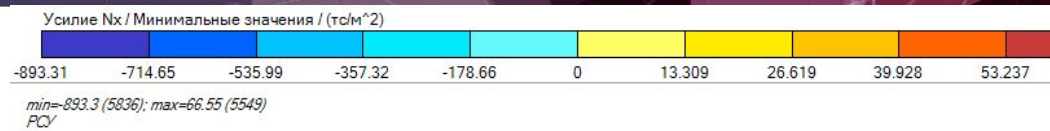






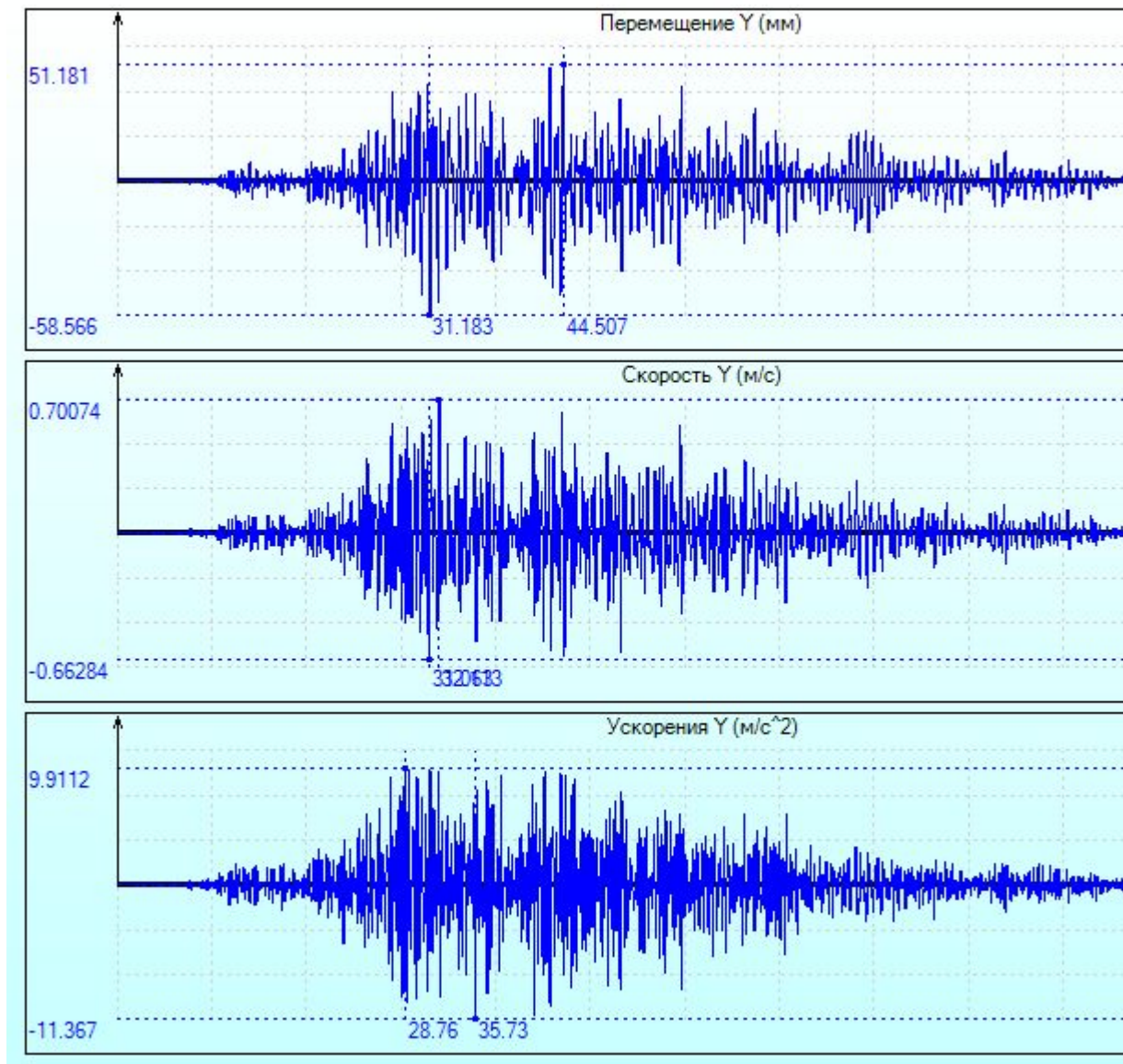
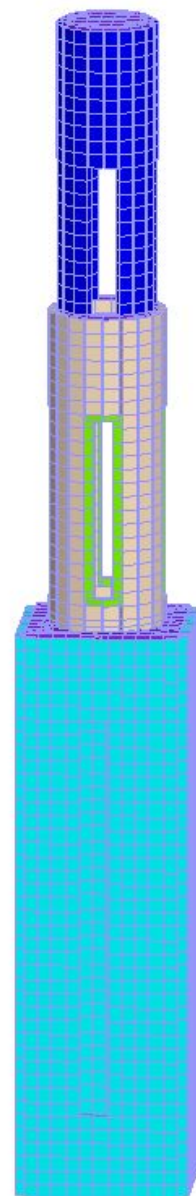
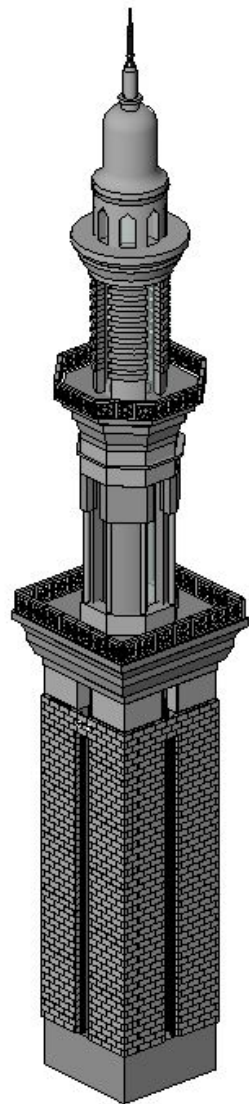
# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ

1.с





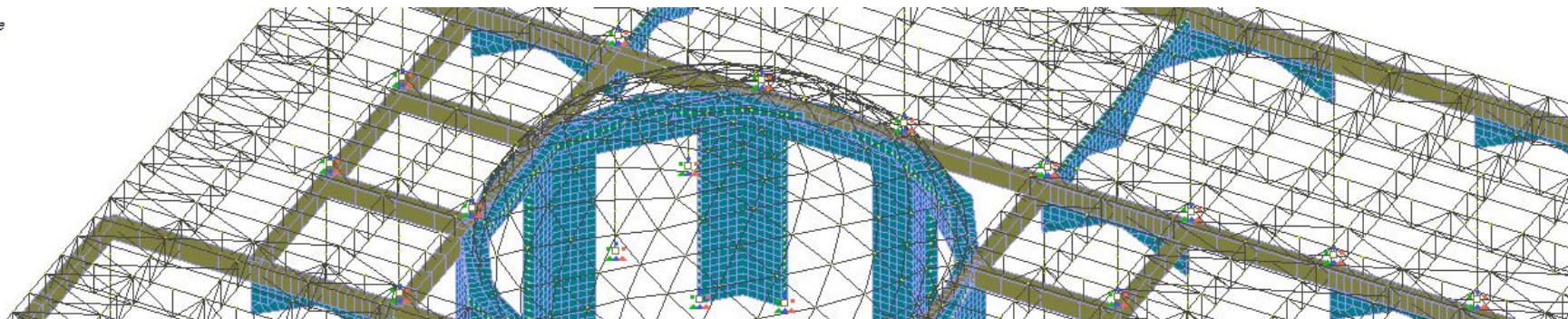
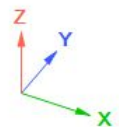
# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ





# РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ МЕЧЕТИ

1... Статическое нагружение



эPCУ в пластинах

Номер	Ст.	Гр.	Крит.	$N_x$ (тс/м <sup>2</sup> )	$N_y$ (тс/м <sup>2</sup> )	$T_{xy}$ (тс/м <sup>2</sup> )	$M_x$ ((тс*м)/м)	$M_y$ ((тс*м)/м)	$M_{xy}$ ((тс*м)/м)	$Q_x$ (тс/м)	$Q_y$ (тс/м)	Плотность энергии (тс/м <sup>2</sup> )	Загружений
9181	1	B	180/10	-29.627	-92.19	-15.392	-64.658	-16.781	-28.551	-3.5597	-34.839	0.46903	31.1133326378961
9181	1	B	170/9	2.7299	34.166	2.228	47.139	11.961	21.193	2.3085	25.75	0.25157	27.4033327208211
9181	1	B	5/12	-19.948	-169.12	-22.159	-95.741	-25.821	-43.717	-3.0247	-45.832	1.0541	31.1966659693668
9181	1	B	5/11	-8.2311	123.01	10.482	82.798	22.209	38.114	2.7444	39.314	0.79168	44.5166656716416
9181	1	B	10/4	-22.027	-167.57	-22.308	-97.369	-26.153	-44.309	-3.3174	-47.19	1.0874	31.1866659695903
9181	1	B	5/1	-6.9383	121.78	10.568	83.455	22.353	38.352	2.8704	39.788	0.80323	44.5066656718652
9181	1	B	5/4	-22.677	-166.5	-22.293	-97.548	-26.167	-44.34	-3.4042	-47.464	1.0904	31.1833326363315
9181	1	B	5/1	-6.9383	121.78	10.568	83.455	22.353	38.352	2.8704	39.788	0.80323	44.5066656718652
9181	1	B	5/4	-22.677	-166.5	-22.293	-97.548	-26.167	-44.34	-3.4042	-47.464	1.0904	31.1833326363315
9181	1	B	5/1	-6.9383	121.78	10.568	83.455	22.353	38.352	2.8704	39.788	0.80323	44.5066656718652
9181	1	B	5/4	-22.677	-166.5	-22.293	-97.548	-26.167	-44.34	-3.4042	-47.464	1.0904	31.1833326363315
9181	1	B	5/1	-6.9383	121.78	10.568	83.455	22.353	38.352	2.8704	39.788	0.80323	44.5066656718652
9181	1	B	185/2	-23.978	-113.27	-17.066	-70.782	-18.302	-31.044	-4.3052	-38.715	0.55996	44.2066656785707
9181	1	B	185/1	2.1317	72.069	6.4377	67.916	17.458	30.313	3.8348	36.48	0.52028	43.1199990361929
9181	1	B	25/10	-24.473	-161.69	-22.054	-97.003	-25.923	-43.946	-3.625	-47.747	1.0755	31.173332636555
9181	1	B	20/9	1.0377	98.516	8.8115	81.456	21.36	37.063	3.2163	41.29	0.75884	43.1533323687812
9181	1	A	5/2	-12.692	-15.974	-4.9828	-0.95437	-0.27848	-0.15313	-0.21479	-0.96147	0.0001391	-0.003333333258827
9181	1	B	5/4	-22.677	-166.5	-22.293	-97.548	-26.167	-44.34	-3.4042	-47.464	1.0904	31.1833326363315
9183	1	B	40/4	-27.964	126.22	47.911	70.175	11.684	34.906	18.719	28.199	0.60217	43.15666570204
9183	1	B	35/3	13.748	-202.59	-77.717	-83.218	-14.704	-41.171	-21.331	-32.675	0.84698	31.173332636555
9183	1	B	10/12	12.11	-215.72	-84.604	-80.731	-14.975	-40.227	-19.377	-30.65	0.80315	31.2033326358845
9183	1	B	5/11	-25.492	161.87	65.367	70.387	12.894	35.266	17.234	26.771	0.61134	44.5233323381593
9183	1	B	5/12	11.735	-215.4	-84.677	-79.684	-14.868	-39.737	-18.974	-30.13	0.78318	31.2066659691433
9183	1	B	5/11	-25.492	161.87	65.367	70.387	12.894	35.266	17.234	26.771	0.61134	44.5233323381593
9183	1	B	5/2	13.559	-210.08	-81.218	-83.786	-15.037	-41.548	-21.031	-32.546	0.86063	31.1833326363315





**ЛИРА**  
СОФТ

# Спасибо за внимание!

[support@lira-soft.com](mailto:support@lira-soft.com)

[www.lira-soft.com](http://www.lira-soft.com)