



**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр



# **ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В.**

*Лаборатория автоматизации исследований и  
проектирования сооружений (ЛАИПС)*

*ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко  
АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»,  
ООО «ЕВРОСОФТ»*

Москва, 2017

**STARK ES** расчеты на основе МКЭ

**МЕТАЛЛ** расчет элементов и узлов стальных конструкций

**ОДИССЕЙ** расчетные параметры сейсмических воздействий

**СпИн** электронный справочник-калькулятор



ЕВРОСОФТ

на рынке САПР в строительстве с 1992г.



— здесь конструкторами применяется лицензионный ПК СТАРКОН

- РАЗРАБОТКА • ПОСТАВКА • ОБУЧЕНИЕ •
- СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОЕКТОВ • РАСЧЕТЫ • ЭКСПЕРТИЗА •

www.eurosoft.ru тел./факс: +7(499) 170-1080, 170-1084, 174-7991, 418-0152 info@eurosoft.ru

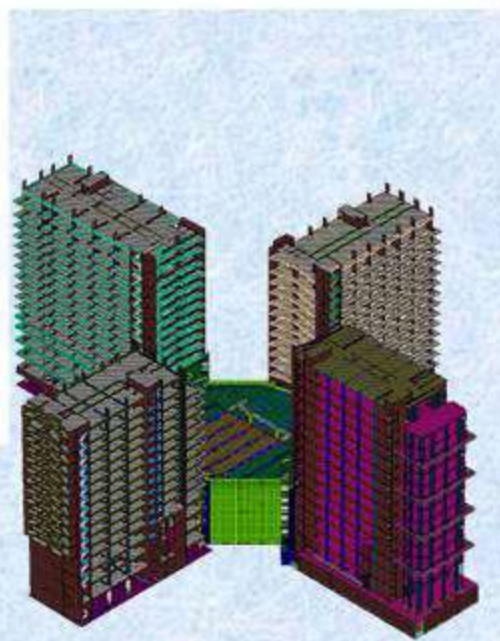
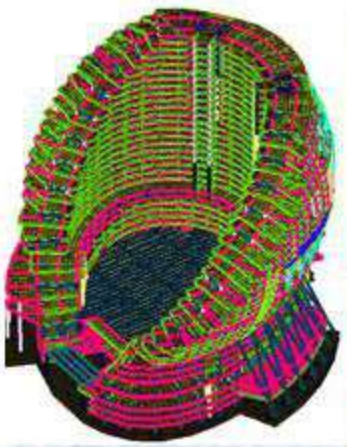
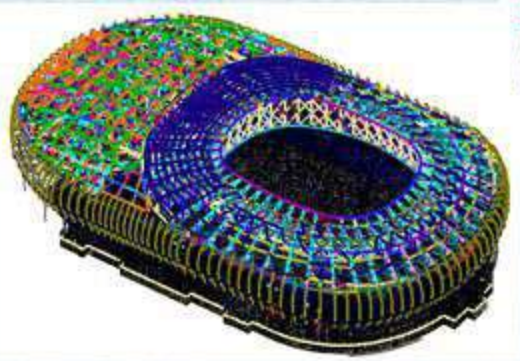
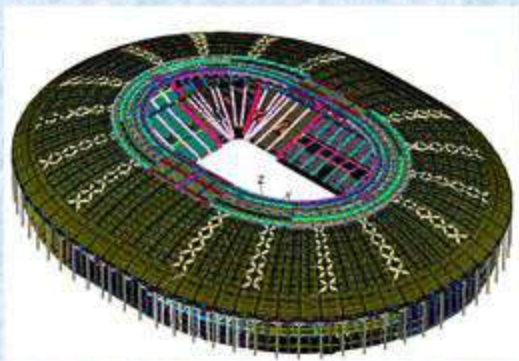


**ПК СТАРКОН**

СТАТИКА, ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**СДЕЛАНО В РОССИИ**

**25 лет эксплуатации, десятки тысяч объектов**



# **Особенности программной реализации указаний СП 14.13330.2014 в ПК STARK ES**

- **Нелинейный динамический расчет во временной области на акселерограммы землетрясений (п. 5.2.2 СП 14.13330.2014, расчет на воздействие уровня МРЗ).**
- **Определение значимых форм собственных колебаний, обеспечивающих требуемую сумму эффективных модальных масс, и исключение несущественных форм (п. 5.9 СП 14.13330.2014).**
- **Учет вклада в динамическую реакцию ненайденных и отброшенных форм собственных колебаний (п. 5.9 СП 14.13330.2014).**
- **Определение опасного направления сейсмического воздействия (п. 5.3 СП 14.13330.2014).**
- **Применение недиагональных матриц масс и демпфирования.**

# Нелинейный динамический расчет во временной области

5.2 При выполнении расчетов сооружений с учетом сейсмических воздействий следует применять две расчетные ситуации:

б) сейсмические нагрузки соответствуют уровню МРЗ (максимальное расчетное землетрясение). Целью расчетов на воздействие МРЗ является предотвращение глобального обрушения сооружения или его частей, создающего угрозу безопасности людей. Формирование расчетных моделей сооружений следует проводить с учетом возможности развития в несущих и ненесущих элементах конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений.

5.2.2 Расчеты, соответствующие МРЗ, следует, как правило, выполнять во временной области с применением инструментальных или синтезированных акселерограмм. Максимальные амплитуды инструментальных или синтезированных ускорений в уровне основания сооружения следует принимать не менее 1,0, 2,0 или 4,0 м/с<sup>2</sup> при сейсмичности площадок строительства 7, 8 и 9 баллов, соответственно, и умножать на коэффициент  $K_0$  таблицы 3. В расчетах на МРЗ следует осуществлять проверку несущей способности конструкций, включая общую устойчивость сооружения или его частей, при максимальных горизонтальных перемещениях, с учетом вертикальной составляющей сейсмических ускорений.

В расчетах с учетом нагрузок, соответствующих МРЗ, во временной области следует принимать коэффициент  $K_1 = 1$ .

# Уравнение относительного движения неупругой конструкции в дискретной постановке по координатам (МКЭ)

$$M \cdot \ddot{Y}(t) + C \cdot \dot{Y}(t) + S(t) = P(t)$$

$M$  – матрица масс конструкции, в общем случае недиагональная;

$C$  – матрица демпфирования;

$\ddot{Y}(t)$ ,  $\dot{Y}(t)$  – неизвестные векторы ускорений и скоростей движения конструкции относительно основания в момент времени  $t$ ;

$S(t)$  – вектор неупругих сил отпора;

$P(t)$  – вектор нагрузок, соответствующий принятой модели сейсмического воздействия

## Численное интегрирование по времени

$$M \cdot \Delta \ddot{Y}(t) + C \cdot \Delta \dot{Y}(t) + K_{\text{кас}}(t) \cdot \Delta Y(t) = \Delta P(t)$$

$K_{\text{кас}}(t)$  – матрица касательной жесткости конструкции в момент времени  $t$ ;

$$\ddot{Y}(t) = \ddot{Y}(t - \Delta t) + \Delta \ddot{Y}(t),$$

$$\dot{Y}(t) = \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta \dot{Y}(t),$$

$$Y(t) = Y(t - \Delta t) + \Delta Y(t),$$

$$S(t) = S(t - \Delta t) + K_{\text{кас}}(t) \cdot \Delta Y(t).$$

# Особенности расчета строительных конструкций

- **Высокая неопределенность исходных данных**
- **Размерность расчетных моделей  $10^5$ - $10^7$**
- **Отсутствие необходимости в результате высокой точности**



Оправдано применение приближенных методов расчета

# Допущение

Локальные  
нелинейности

Нелинейность остальной  
конструкции

$$K_{\text{кас}}(t) = K_{\text{loc,кас}}(t) + \chi(t)(K - K_{\text{loc}})$$

$K_{\text{loc,кас}}(t)$  – матрица касательной жесткости нелинейных элементов;

$K$  – матрица начальной жесткости всей системы (при  $Y=0$ );

$K_{\text{loc}}$  – матрица начальной жесткости нелинейных элементов (при  $Y=0$ );

$\chi(t)$  – коэффициент пропорциональности.



## Решение прямым интегрированием

$$M \cdot \Delta \ddot{Y}(t) + C \cdot \Delta \dot{Y}(t) + \chi(t)K \cdot \Delta Y(t) = \\ = \Delta P(t) + [\chi(t)K_{loc} - K_{loc,кас}(t)] \cdot \Delta Y(t)$$

Число уравнений:  $10^5$ - $10^7$

Число шагов по времени:  $10^3$ - $10^5$

Вариантов сейсмического воздействия: 3-5

## Решение методом разложения по формам колебаний (или векторам Ритца)

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{\Psi}(t) + C_f \cdot \Delta \dot{\Psi}(t) + \chi(t) K_f \cdot \Delta \Psi(t) = \\ = \Phi^T \Delta P(t) + \Phi^T [\chi(t) K_{loc} - K_{loc, кас}(t)] \Phi \cdot \Delta \Psi(t) \end{aligned}$$

Число уравнений:  $10^2-10^3$ ,

при отсутствии локальных нелинейностей  $\leq 10^2$

$\Phi$  – матрица  $M$ -ортоноормированных форм собственных колебаний  
( $\Phi^T M \Phi = E$ ),  $(K - \omega_i^2 M) \varphi_i = 0$  ;

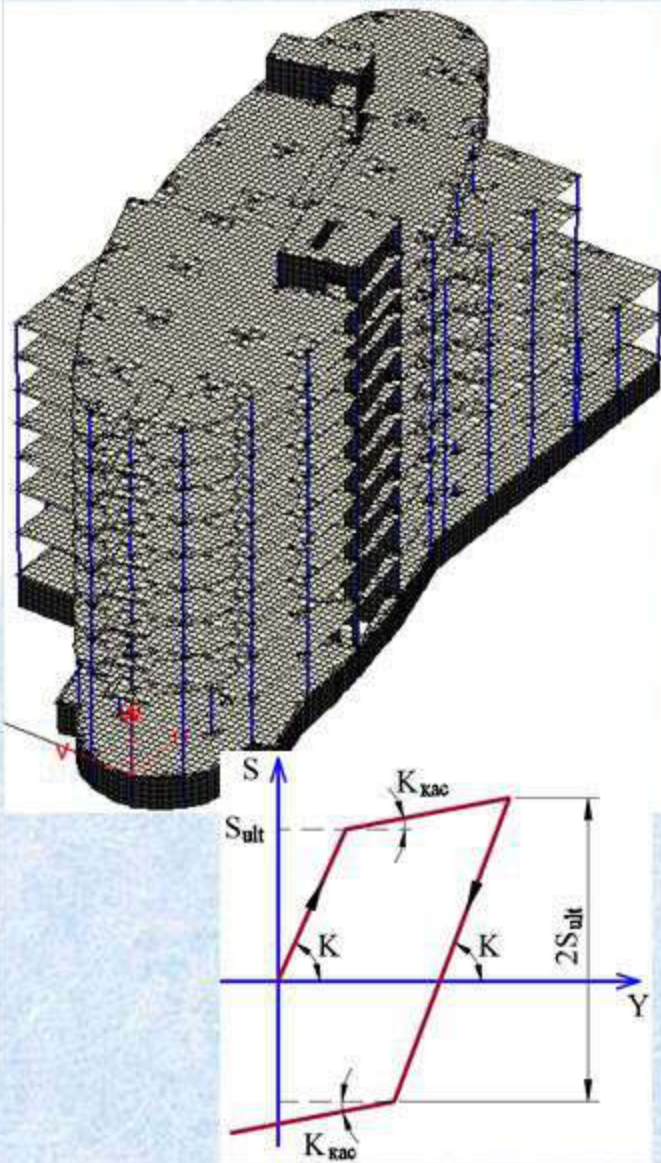
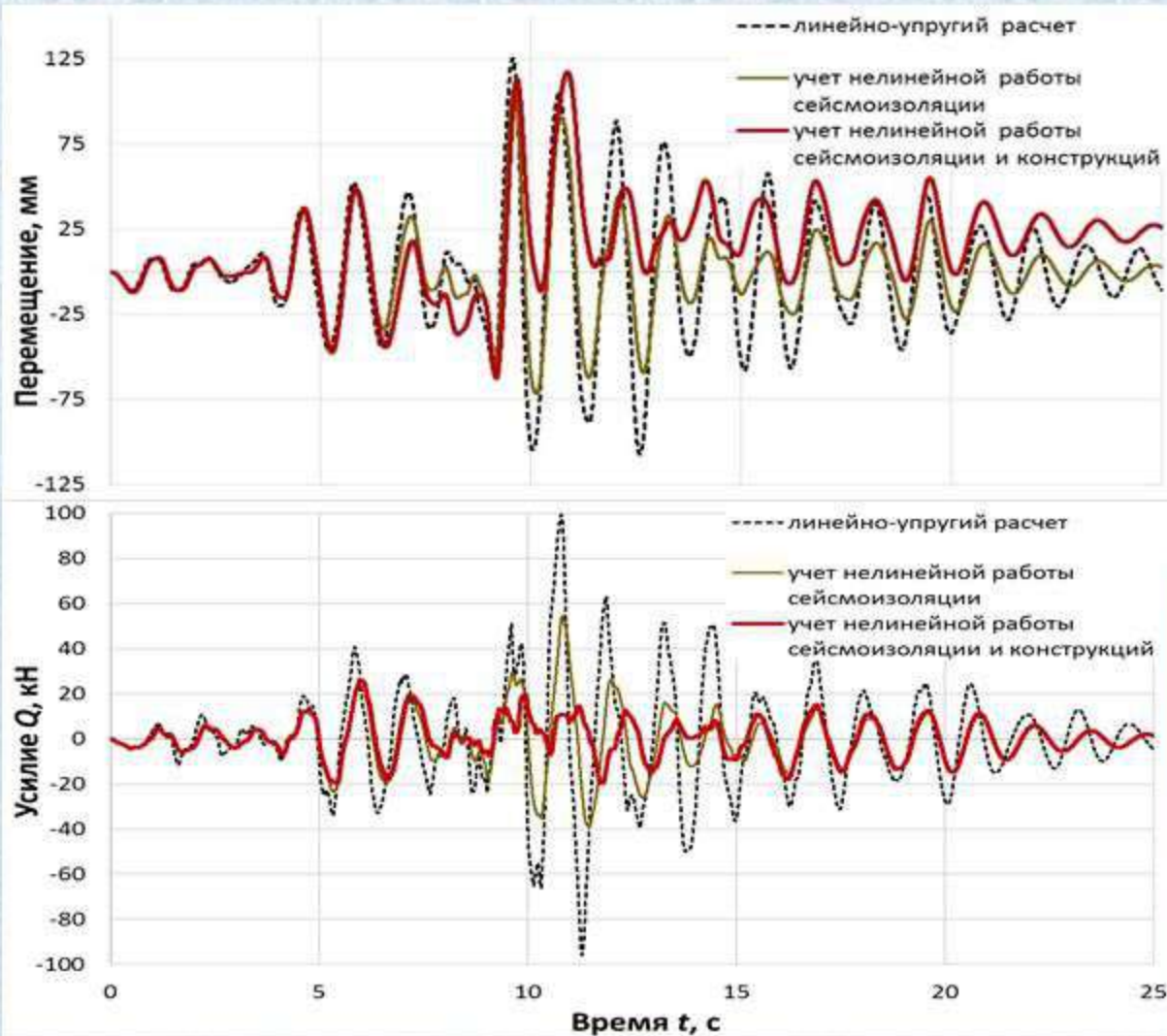
$C_f = \Phi^T C \Phi$  – в общем случае недиагональная матрица;

$K_f = \Phi^T K \Phi$  – диагональная матрица, элементы которой равны  
квадратам круговых собственных частот конструкции;

$\Delta \ddot{\Psi}(t)$ ,  $\Delta \dot{\Psi}(t)$ ,  $\Delta \Psi(t)$  – векторы приращений ускорений, скоростей  
и перемещений в нормальных координатах, такие, что

$$\Delta \ddot{Y}(t) = \Phi \cdot \Delta \ddot{\Psi}(t), \Delta \dot{Y}(t) = \Phi \cdot \Delta \dot{\Psi}(t), \Delta Y(t) = \Phi \cdot \Delta \Psi(t).$$

# Результаты линейного и упругопластического расчетов каркаса здания в ПК STARK ES



# Скорость решения нелинейной задачи методом разложения по формам колебаний



Общее число степеней свободы системы – 319920

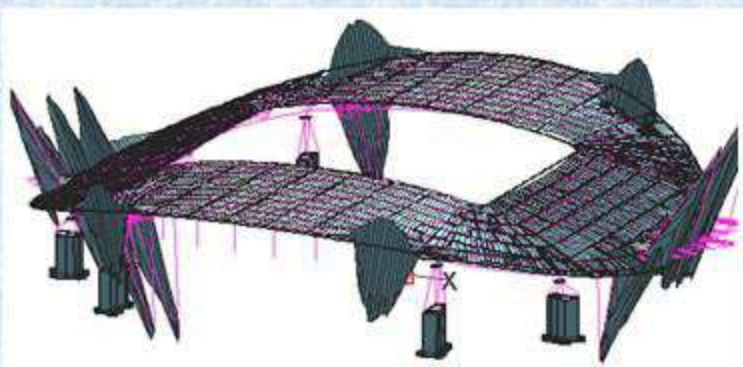
Число шагов интегрирования по времени – 13020

# Отбор значимых форм собственных колебаний, обеспечивающих требуемую сумму эффективных модальных масс, и исключение несущественных форм

$$\Sigma \mu = \frac{H^T H}{B^T M B}$$

$$H = \Phi^T M B$$

$B$  – вектор связи степеней свободы системы с направлением сейсмического движения основания



Параметры расчета

Тип расчета

Статический расчет

Собственные колебания

Сейсмический

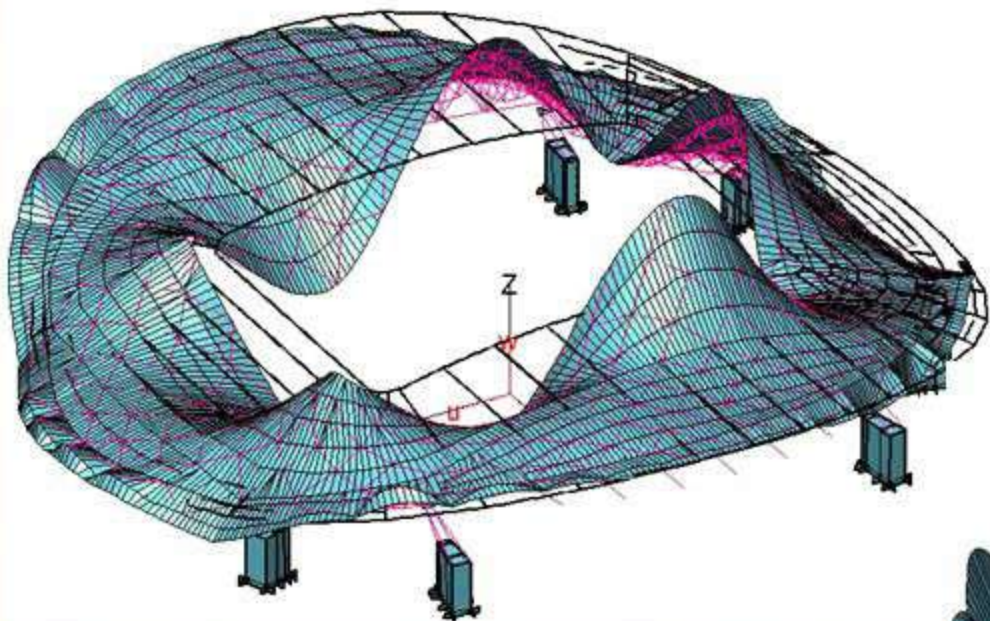
Пар

Параметры сейсмического режима

Требуемая сумма модальных масс [%]	Минимальный порог [%]
Поступательное воздействие	
X: 90.00	1.00
Y: 90.00	1.00
Z: 75.00	1.00
<input type="checkbox"/> Учёт вращательного воздействия	

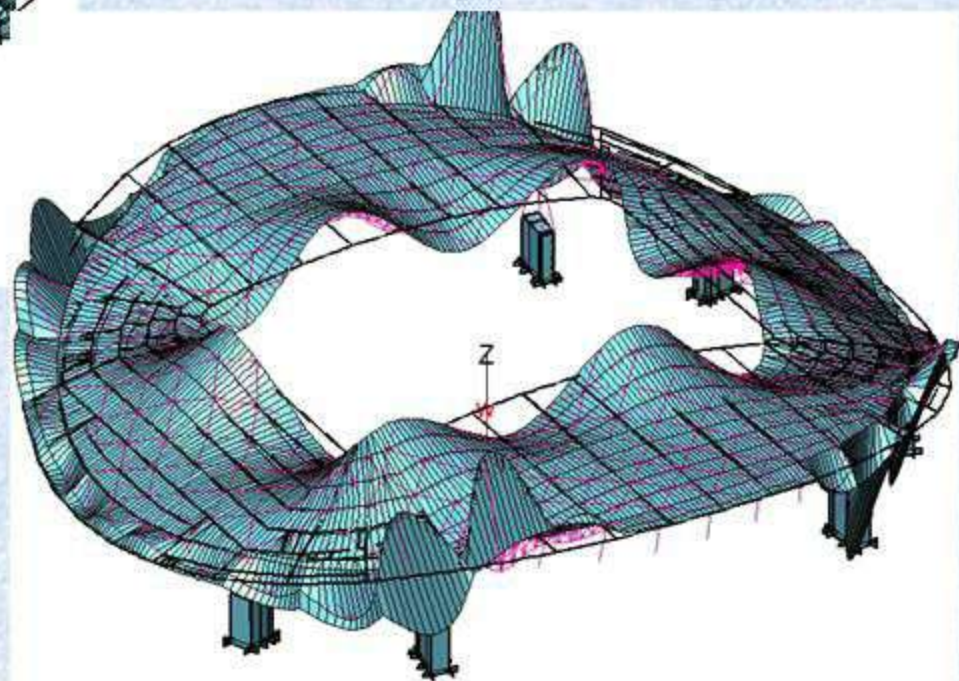
Сумма модальных масс, %		Mx	My	Mz
	Кол-во собств. значений			
Найдено	371	93.49	93.49	83.87
Отобрано	15	90.39	90.39	82.05
Исключено	356	3.11	3.11	1.82

**Отбор значимых форм собственных колебаний, обеспечивающих требуемую сумму эффективных модальных масс, и исключение несущественных форм**



**Модальная масса 55% - форма учитывается**

**Модальная масса 0% - форма отбрасывается**



## Приближенный учет вклада в динамическую реакцию ненайденных и отброшенных форм колебаний

Псевдоформа, заменяющая собой все отброшенные и неизвестные (ненайденные) собственные формы, участвующие в колебаниях вследствие поступательного движения основания по данному направлению, может быть найдена из выражения:

$$\varphi_{\text{вар}1}^* = B - \Phi H$$

«+» сумма модальных масс 100%

«-» ошибка определения частоты

$$K\varphi_{\text{вар}2}^* = M(B - \Phi H)$$

«+» частота определяется хорошо

«-» сумма модальных масс меньше 100%

## Приближенный учет вклада в динамическую реакцию ненайденных и отброшенных форм колебаний

Псевдоформу следует нормировать, разделив её на

$$\sqrt{(\varphi^*)^T M \varphi^*}$$

Круговая частота колебаний по псевдоформе:

$$\omega^* = \sqrt{(\varphi^*)^T K \varphi^*}$$

Псевдоформа удовлетворяет условиям ортогональности:

$$(\varphi^*)^T M \varphi_j = 0$$

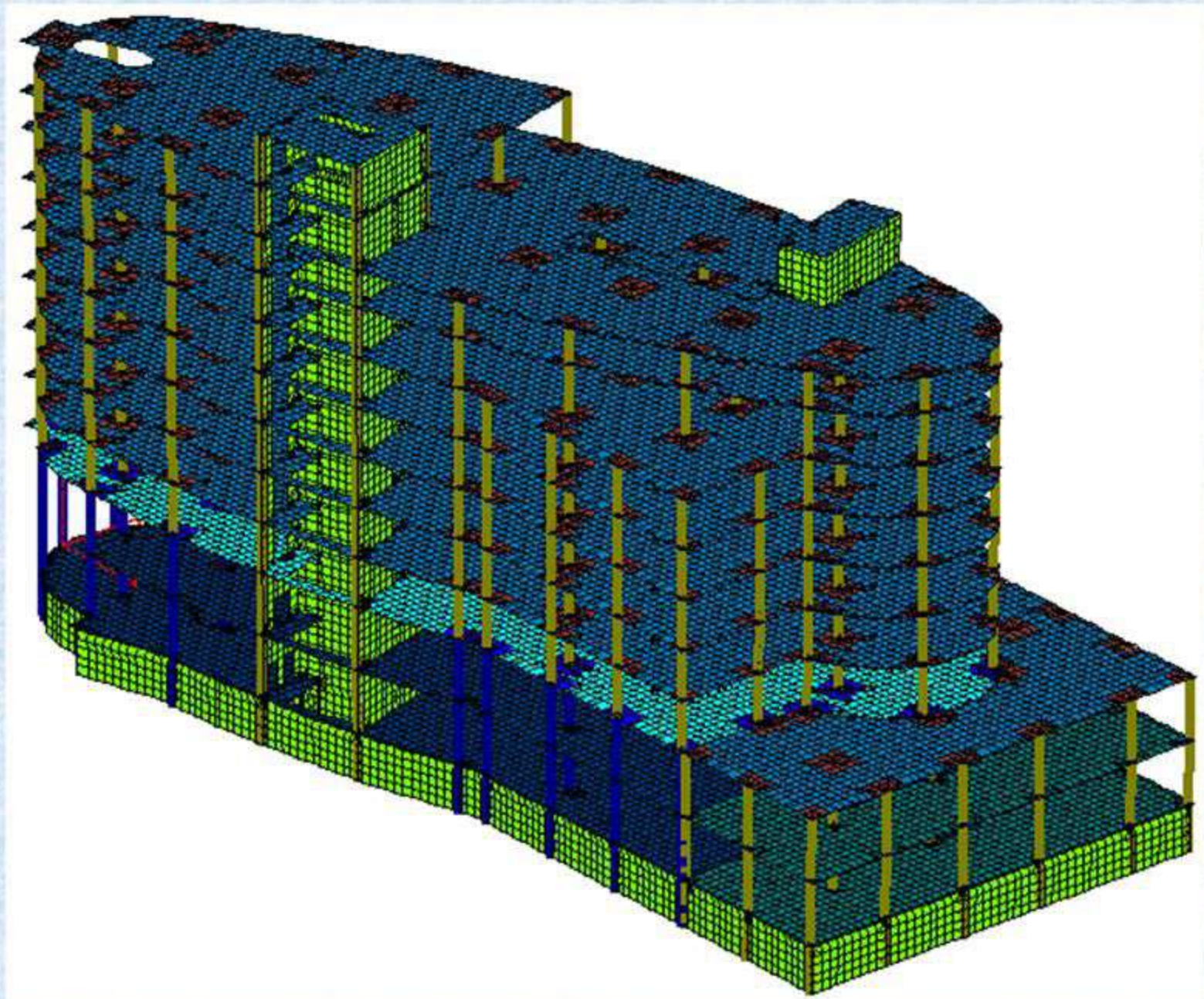
$$(\varphi^*)^T K \varphi_j = 0$$

НО псевдоформа не является собственной формой:

$$(K - \omega^{*2} M) \varphi^* \neq 0$$



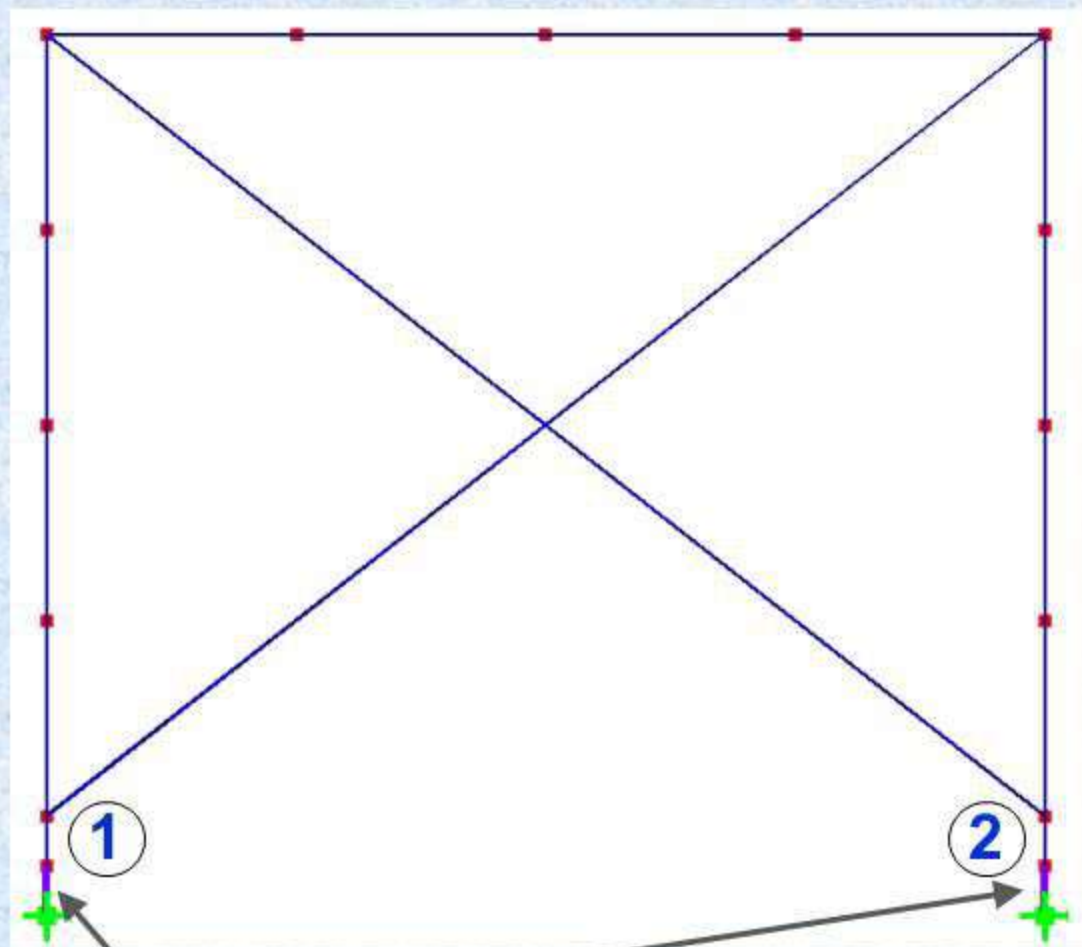
## Пример. Линейная задача



## Результаты расчетов с учетом псевдоформ

Количество удержанных собственных форм	Сумма эффективных модальных масс по удержанным собственным формам, %	Частоты колебаний по удержанным собственным формам, Гц	Частоты колебаний по псевдоформам X;Y;Z, Гц	Усилие, кН		Погрешность, %	
				решение во временной области	решение в частотной области	решения во временной области	решения в частотной области
Решения с использованием собственных форм							
<b>30 из 200</b>	<b>97.25</b>	<b>0.74...9.37</b>	-	<b>1401</b>	<b>1246</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
3	59.69	0.74...0.95	-	524	516	-62.6	-58.6
1	16.59	0.74	-	283	285	-79.8	-77.1
Приближенные решения с использованием псевдоформы 1							
3	59.69	0.74...0.95	4.25;4.39; 65.09	532	638	-62.0	-48.8
1	16.59	0.74	2.58;3.16; 65.08	307	958	-78.1	-23.1
Приближенные решения с использованием псевдоформы 2							
3	59.69	0.74...0.95	2.16;1.84; 5.01	1173	1370	-16.3	10.0
1	16.59	0.74	1.04;0.97; 4.98	1586	1412	13.2	13.3

## Пример. Нелинейная задача



**Свойства  
сейсмоизоляторов:**

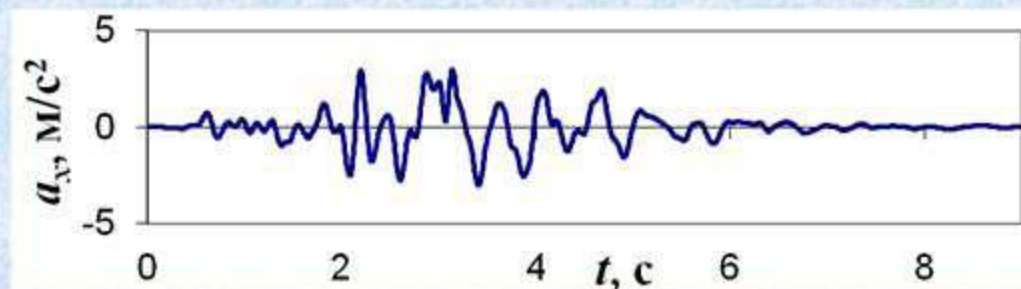
$$k_{\text{упр}} = 13250 \text{ кН/м}$$

$$k_{\text{кас,пл}} = 750 \text{ кН/м}$$

$$S_{1,\text{ult}} = 100 \text{ кН}$$

$$S_{2,\text{ult}} = 150 \text{ кН}$$

Уругопластические  
резинометаллические  
сейсмоизоляторы

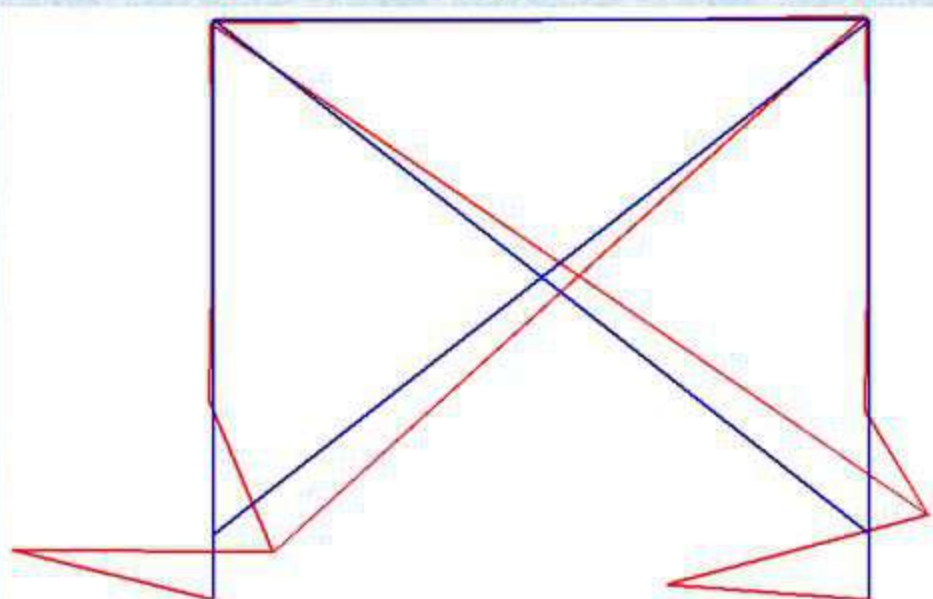


# Результаты

Число учтённых форм	Сумма эф. мод. масс	Линейное решение			Нелинейное решение		
		Перемещение, мм	Прод. сила в диаг. связи, кН	Попер. сила в опоре левой колонны, кН	Перемещение, мм	Прод. сила в диаг. связи, кН	Попер. сила в опоре левой колонны, кН
69 (точное решение)	1	30	152.6	176.4	27.8	115.3	107.5
68	1	30	152.6	176.4	27.8	115.3	168.3
67	1	30	152.6	176.4	27.8	115.3	245
19	1	30	152.6	176.4	27.9	115.4	262.7
9	0.9999	30	152.6	176.4	28.1	116	262.3
5	0.9968	30	152.6	176.4	28.3	119.4	235.2
3	0.986	30	152.6	176.4	29	132.3	194.1
1	0.955	30	153	176	29.6	150.9	173.5

# Необходимые формы колебаний

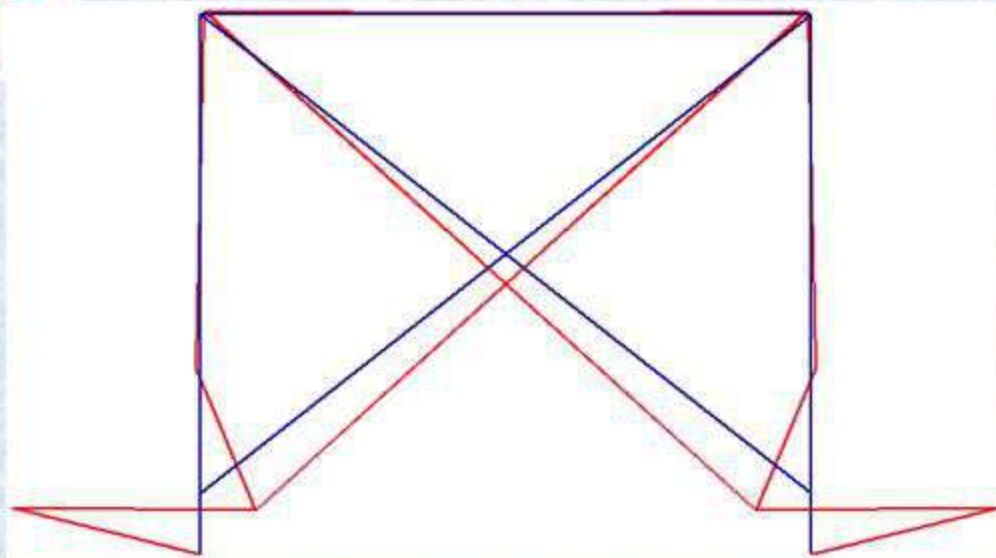
## Форма 68



Для получения нелинейного решения методом разложения по формам колебаний необходимо учесть не только формы с ненулевой модальной массой, но и локальные формы – деформации нелинейных элементов

Эти формы имеют нулевую модальную массу при поступательном движении основания и на линейное решение не влияют

## Форма 69



## Отбор локальных форм собственных колебаний

$$\mu_{loc,ij} = \frac{H_{loc,ij}^2}{B_{loc,i}^T \cdot M \cdot B_{loc,i}} \quad \text{локальная модальная масса}$$
$$H_{loc,ij} = \varphi_j^T M B_{loc,i}$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{форм}}} \mu_{loc,ij} = \frac{H_{loc,i}^T \cdot H_{loc,i}}{B_{loc,i}^T \cdot M \cdot B_{loc,i}} \quad \text{сумма локальных модальных масс}$$
$$H_{loc,i} = \Phi^T M B_{loc,i}$$

$$B_{loc,i} = (0 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ \dots \ 0 \ 0)^T$$

$$i = [1 \dots \text{Число нелинейных ст.св.}]$$



Форма 1



Форма 2

**Решение будет  
точным**



**Получить точное  
решение возможно с  
использованием  
векторов Ритца, но не  
форм СК**

**Единственная форма колебаний**

## Определение опасного направления сейсмического воздействия.

При расчете здания или сооружения требуется рассмотреть ряд наиболее опасных направлений сейсмического воздействия (пункт 5.3 СП 14.13330.2014). В качестве одного из них может служить то направление  $k$ , при котором удельная обобщенная энергия упругой деформации  $\bar{W}_k$  достигает максимума [7].

При использовании линейно-спектрального метода расчета величину  $\bar{W}_k$  можно определить следующим образом:

$$\bar{W}_k = \sum_{i=1}^N \bar{W}_{ik} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\beta_i H_{ik}}{\omega_i} \right)^2 = \frac{1}{2} (K_f^{-1} H_k^2)^T \beta^2$$



## Особенность применения недиагональных матриц масс и демпфирования.

Все расчетные формулы в СП 14.13330.2014 приведены для случая, когда матрица масс является диагональной. Однако в большинстве современных программ, использующих метод конечных элементов, предоставлена возможность более точного расчета с применением согласованной с матрицей жесткости недиагональной матрицы масс, построенной с использованием функций форм конечных элементов. В этом случае можно использовать следующую формулу для определения вектора узловых сейсмических нагрузок, возникающих при колебаниях по  $i$ -й форме при сейсмическом воздействии в направлении  $k$ :

$$S_{ik} = M\eta_{ik}A\beta_i K_{\psi},$$

где  $\eta_{ik} = \varphi_i H_{ik}$

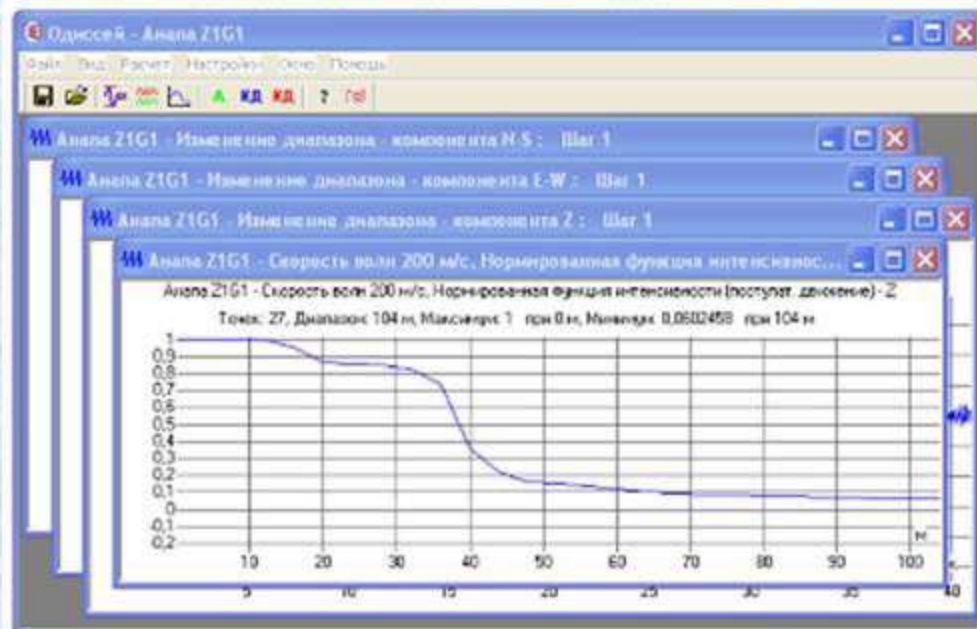
# Программа «Одиссей 1.0»

The screenshot displays the 'Одиссей - Z1\_Ishod' application window. The main interface is divided into several panes, each showing a different view of seismic data. The top-left pane shows a plot of acceleration components (b(T) Сочил) over time (0 to 19 seconds). The top-middle pane shows a plot of acceleration components (m/c2 Сочил) over time (0 to 40 seconds). The top-right pane shows a plot of acceleration components (m/c2 Сочил) over time (0 to 40 seconds). The middle-left pane shows a plot of acceleration components (b(T) Сочил) over time (0 to 19 seconds). The middle-middle pane shows a plot of acceleration components (m/c2 Сочил) over time (0 to 40 seconds). The middle-right pane shows a plot of acceleration components (m/c2 Сочил) over time (0 to 40 seconds). The bottom-left pane shows a plot of acceleration components (b(T) Сочил) over time (0 to 19 seconds). The bottom-middle pane shows a plot of acceleration components (m/c2 Сочил) over time (0 to 40 seconds). The bottom-right pane shows a plot of acceleration components (m/c2 Сочил) over time (0 to 40 seconds).

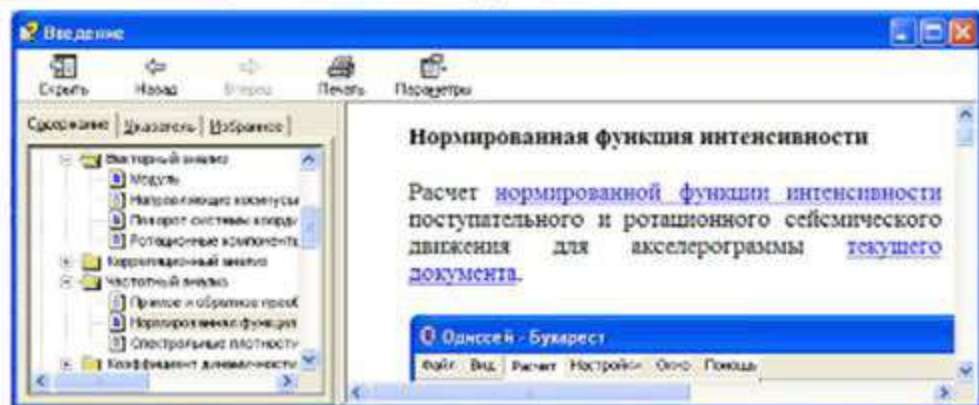
- **Импорт акселерограмм** – поступательных компонент сейсмического движения грунта – из файлов формата TXT
- **Поворот исходной системы координат**
- **Корреляционный анализ** (функция когерентности, вычисление коэффициентов корреляции, матрица коэффициентов корреляции)
- **Частотный анализ** (прямое и обратное преобразование Фурье, функция стандарта от частоты)
- **Построение функции коэффициента динамичности** (средняя линия поверхности дисперсии в осях частот и в осях периодов)
- **Фильтрация** (исключение) сейсмических волн по частоте и по длине волны
- **Вычисление ротационных компонент сейсмического движения грунта**
- **Вычисление спектров**
- **Отделение интересующего диапазона данных по оси абсцисс**
- **Масштабирование данных по оси ординат**
- **Сохранение обработанных акселерограмм и других данных**
- **Экспорт акселерограмм и коэффициентов динамичности в ПК STARK ES**
- **Печать изображения текущего вида (окна)**

# Программа «Одиссей 2.0»

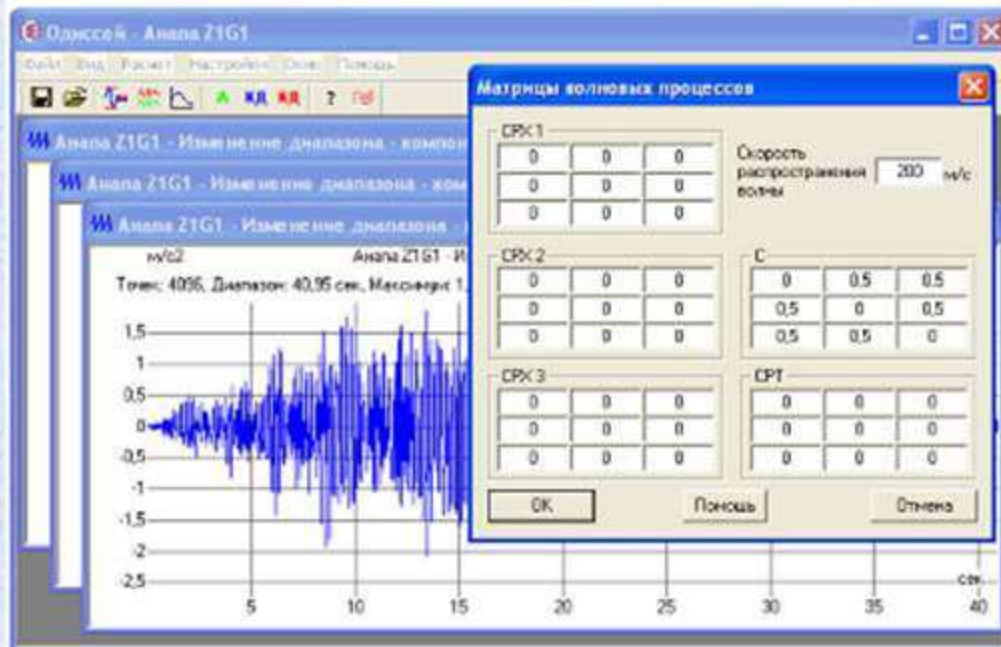
## Версия 2.0 (СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ)



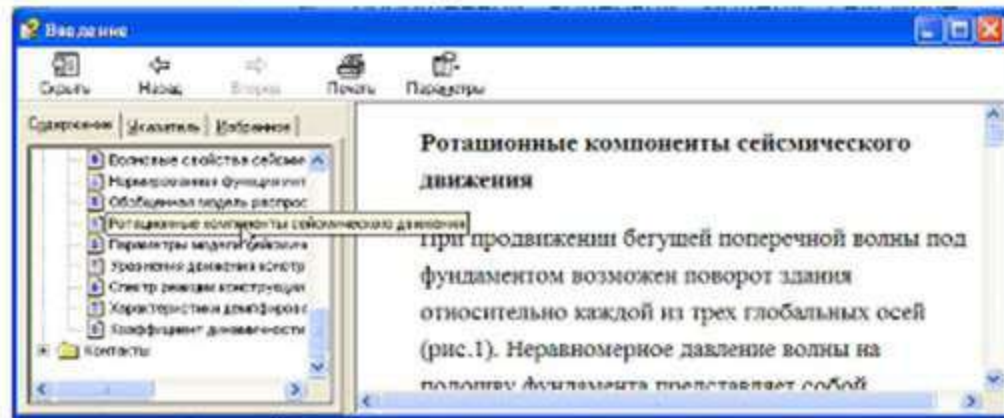
Определение вида волновой модели (интегральная дилатационная, интегральная дилатационно-ротационная или дифференцированная) по графику нормированной функции интенсивности поступательного движения грунта. Обоснование необходимости учета ротаций основания сооружения.



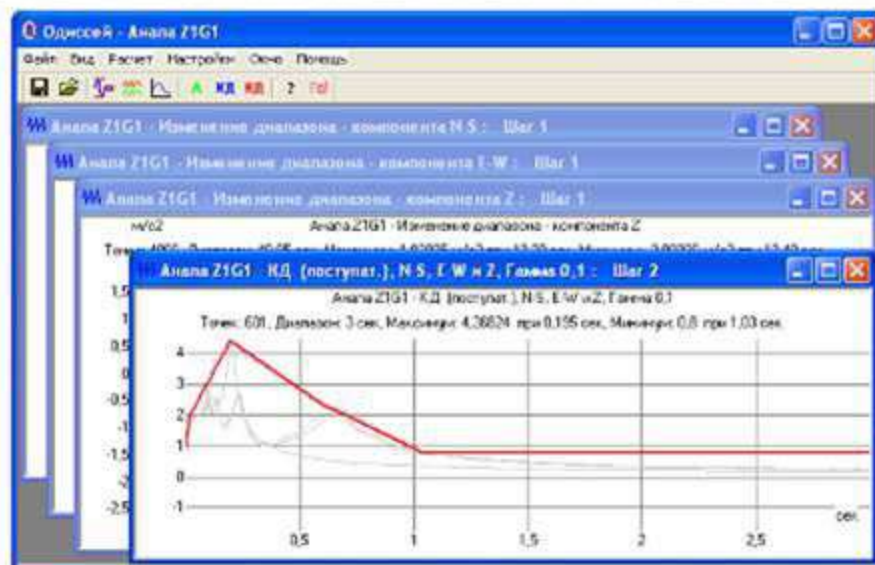
# Программа «Одиссей 2.0»



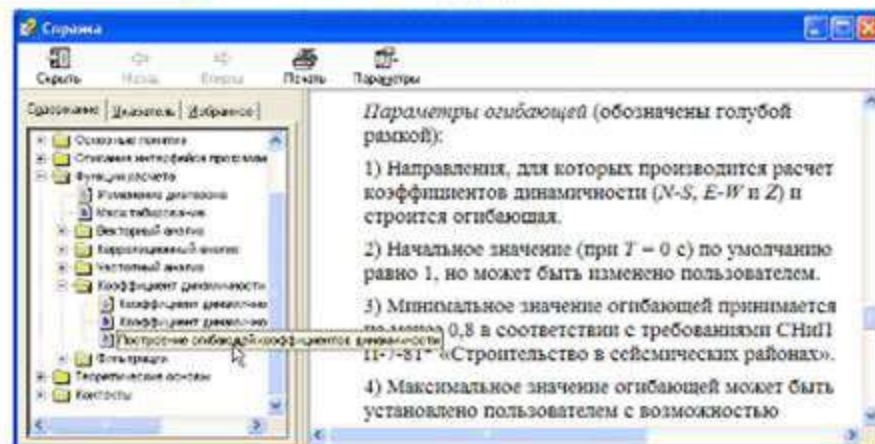
Расчет ротационных компонент вектора сейсмического воздействия на основе обобщенной волновой модели сейсмического движения грунта.



# Программа «Одиссей 2.0»

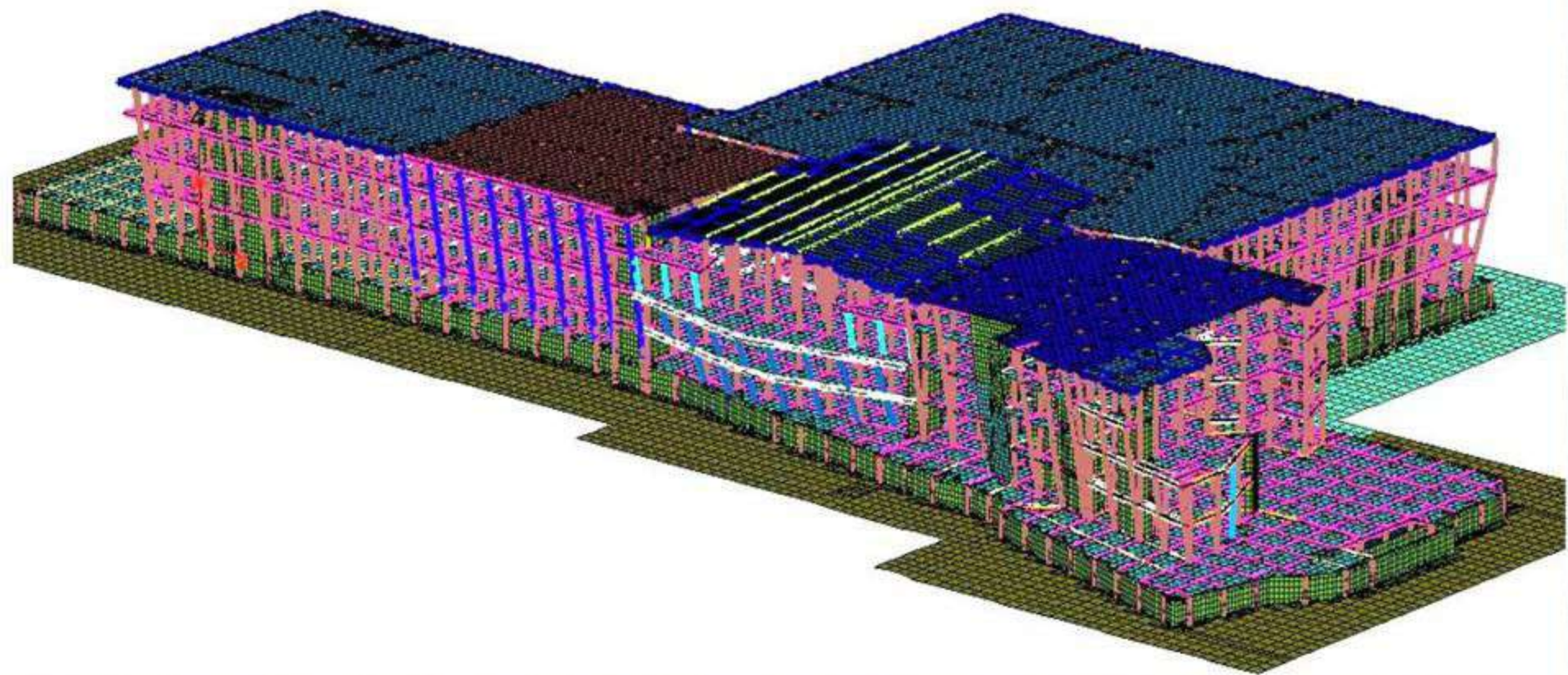


Построение огибающей одного, двух или трех коэффициентов динамичности для поступательного или ротационного движения грунта. Экспорт огибающей в формат ПК STARK ES или в формат txt.



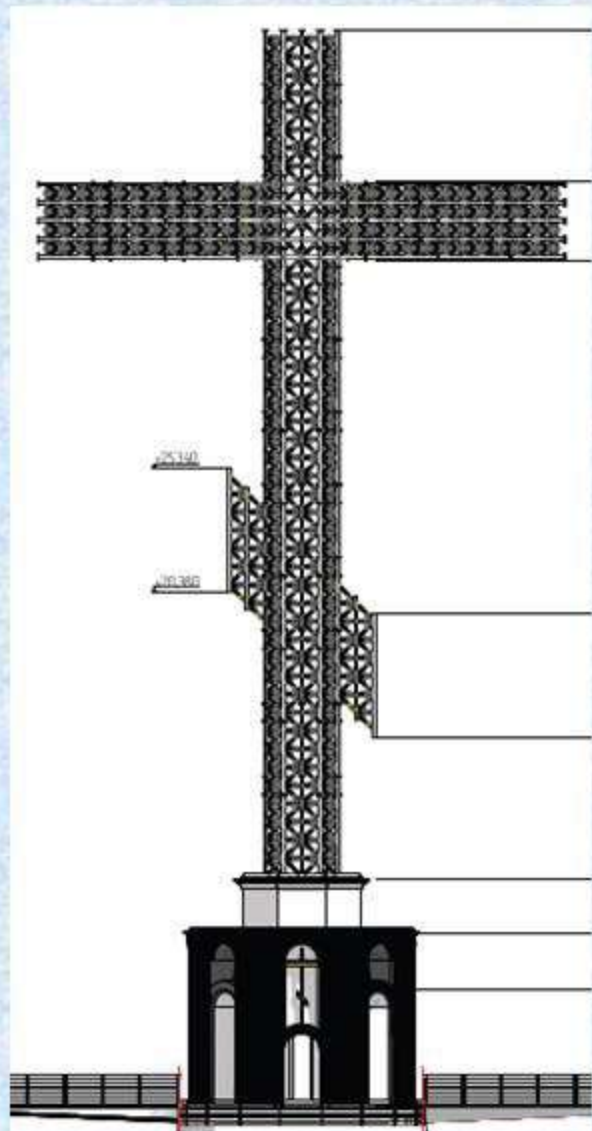
Для удобства пользователей программа снабжена справочной системой, в которой, помимо подробного описания функций расчета, имеется справочник по теоретическим основам реализованных в программе расчетов.

# Анализ расчетных предпосылок, принятых при выполнении расчета несущего каркаса здания ТЦ «ГРОЗНЫЙ МОЛЛ»

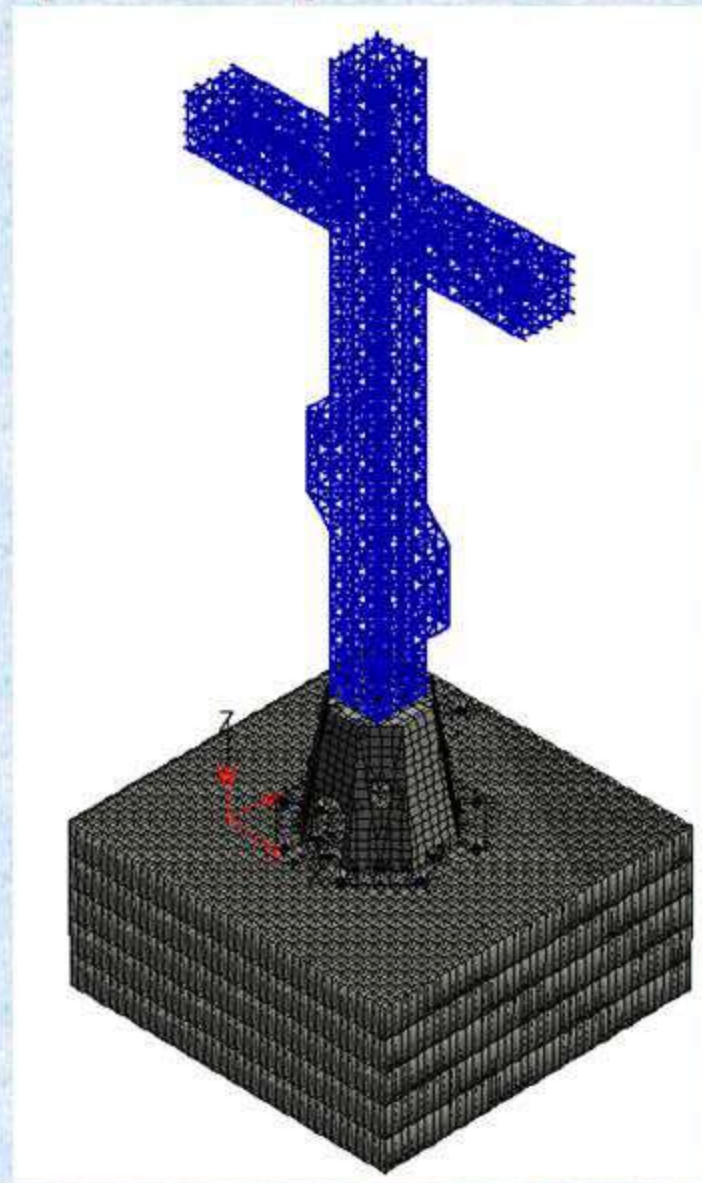


Расчетная модель в ПК **STARK ES**

# Православный крест высотой 43.2 м с часовней в г. Геленджике Краснодарского края

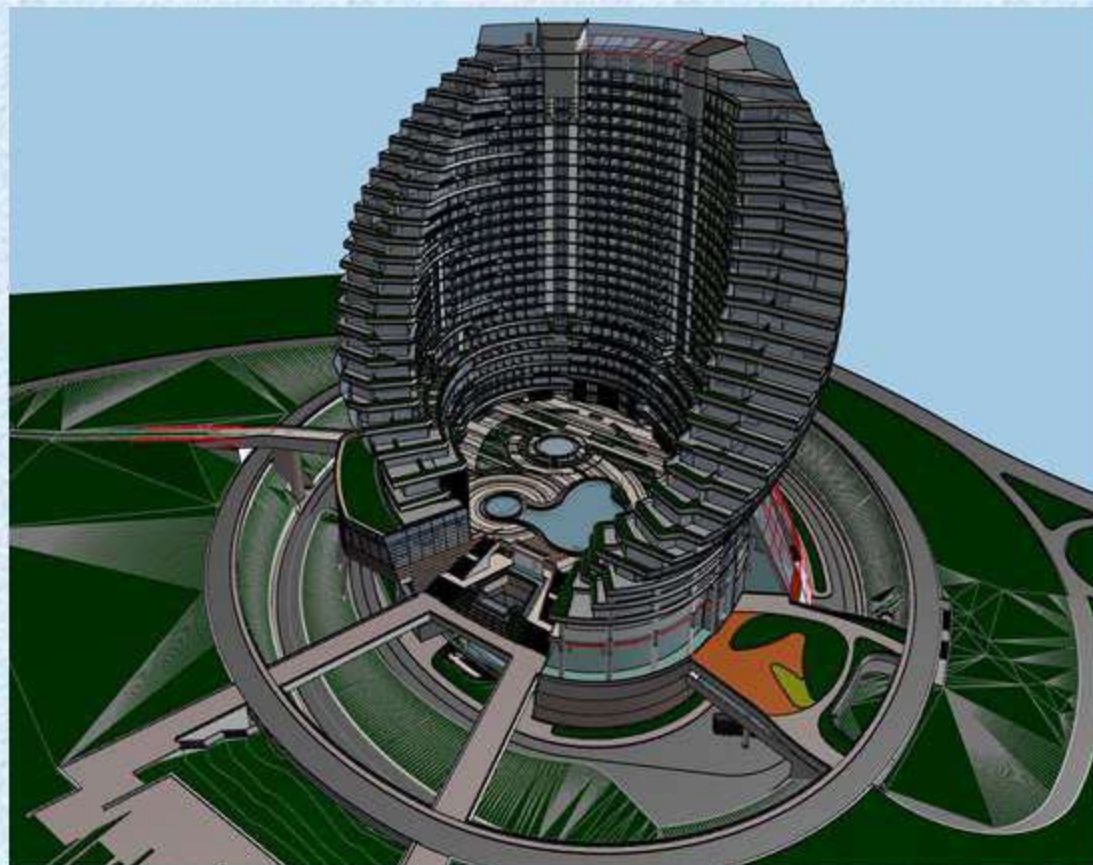


Нижняя часть – монолитные ЖБК,  
выше – стальной каркас

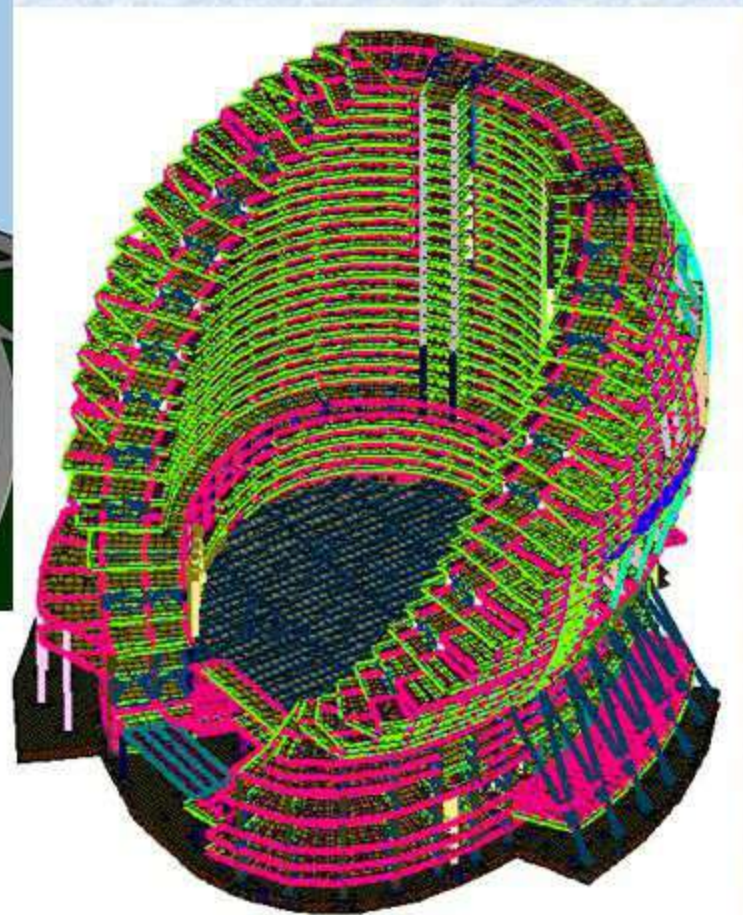


Расчетная модель в ПК **STARK ES**

# Многофункциональный гостиничный комплекс 5\* «Ойстер Гранд Отель энд Спа», г. Анапа



30 этажей, ~112 м  
в плане 170x150 м

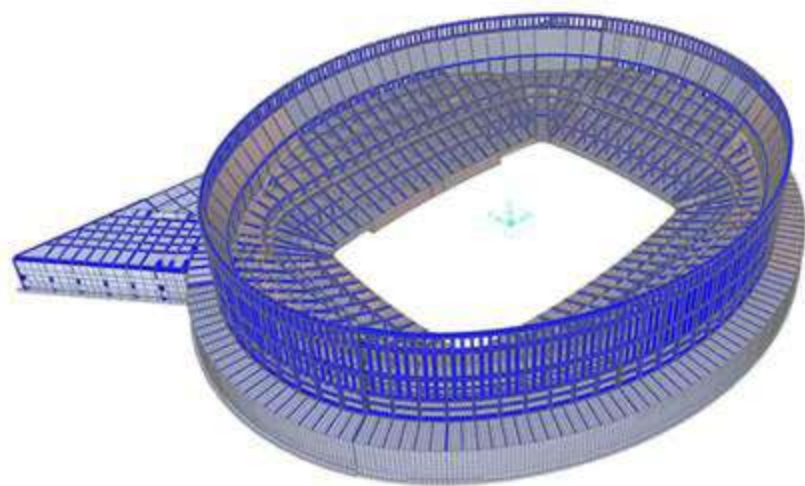


Нижняя часть – монолитные ЖБК,  
выше – стальной каркас

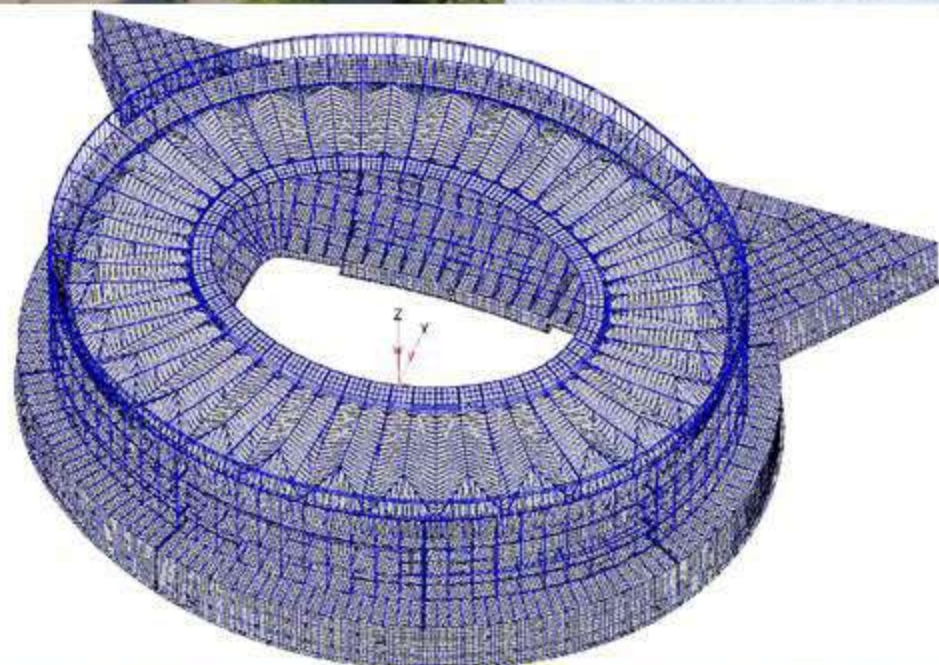
Расчетная модель в ПК **STARK ES**



# СТАДИОН «АРЕНА-КРАСНОДАР» на 33 тыс. зрителей

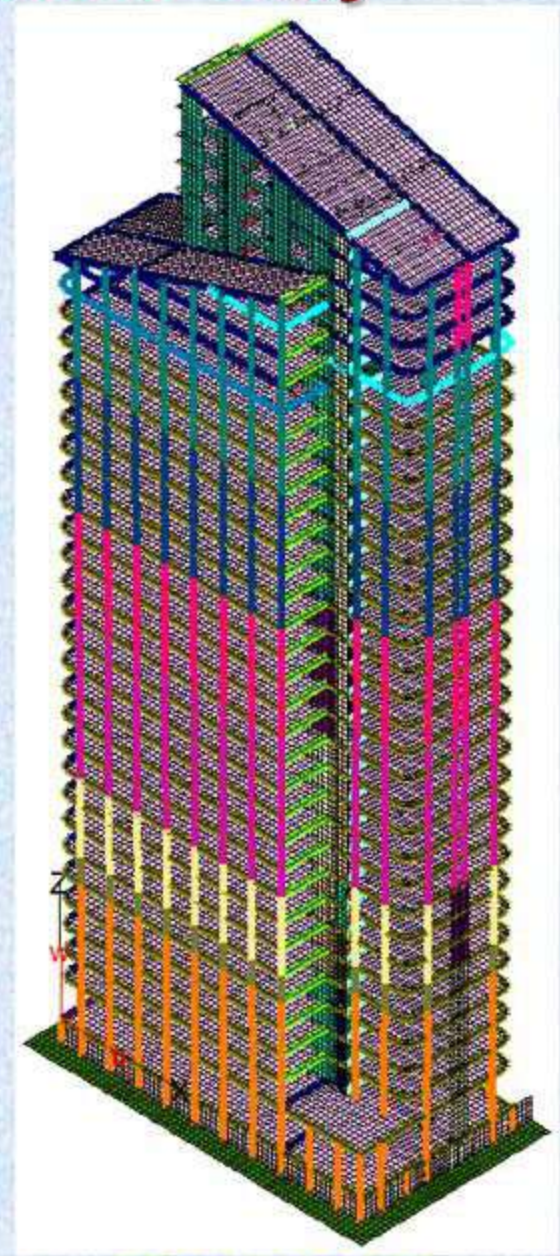
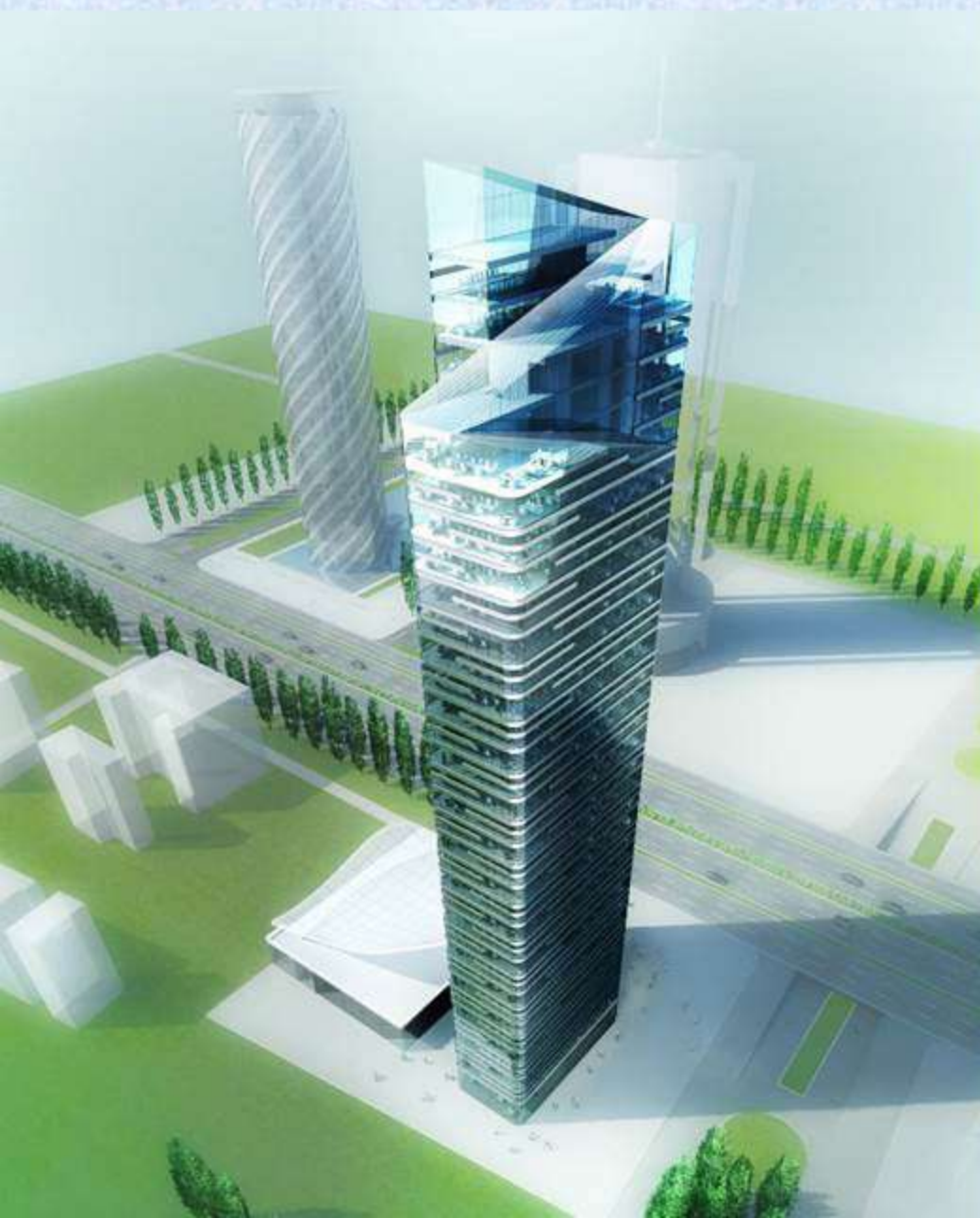


SAP2000



STARK ES

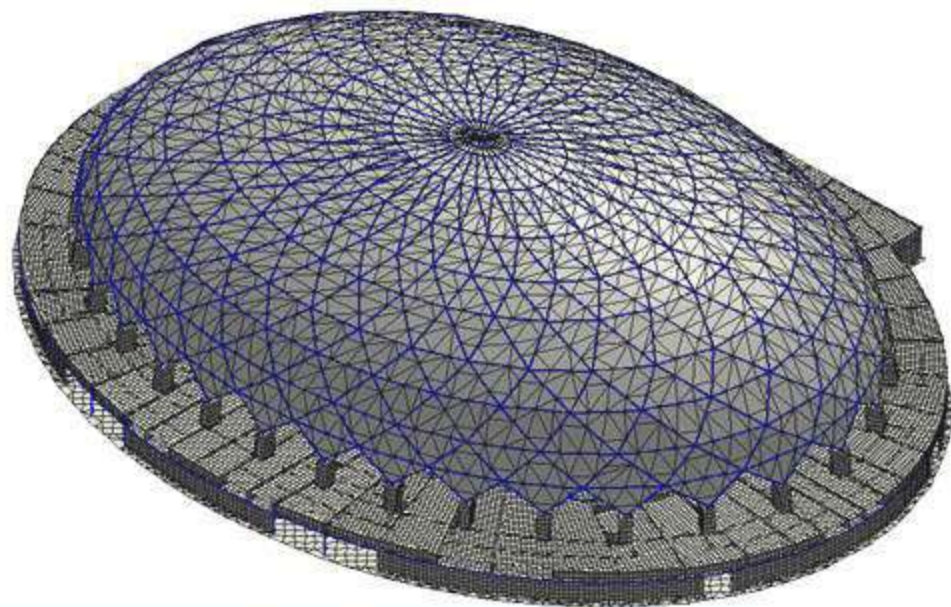
# Офисное здание «Azvil» в г. Баку



**STARK ES**

# Большая ледовая арена для хоккея с шайбой на 12 тыс. мест в г. Сочи

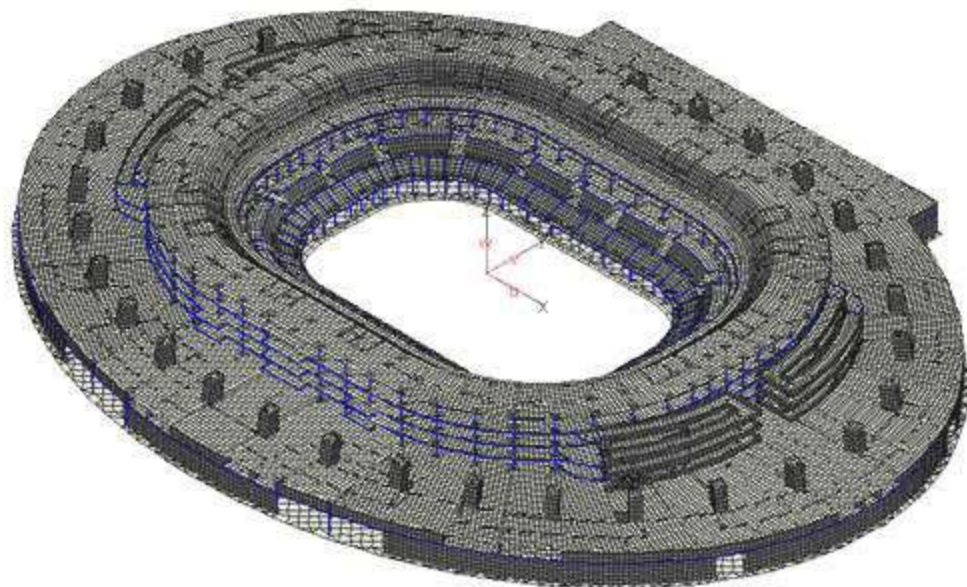
Размеры в плане 169x220 м  
Высота 40.7 м



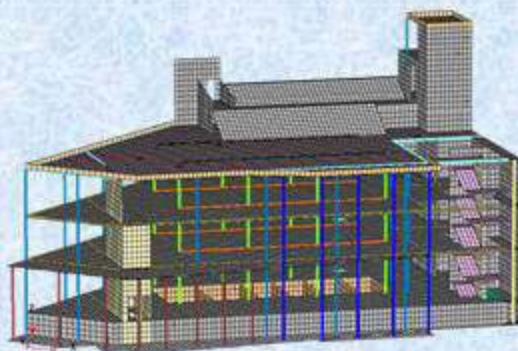
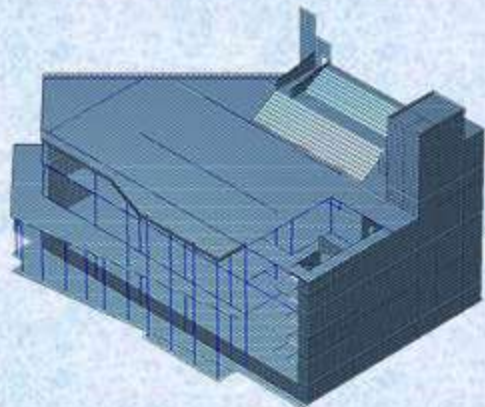
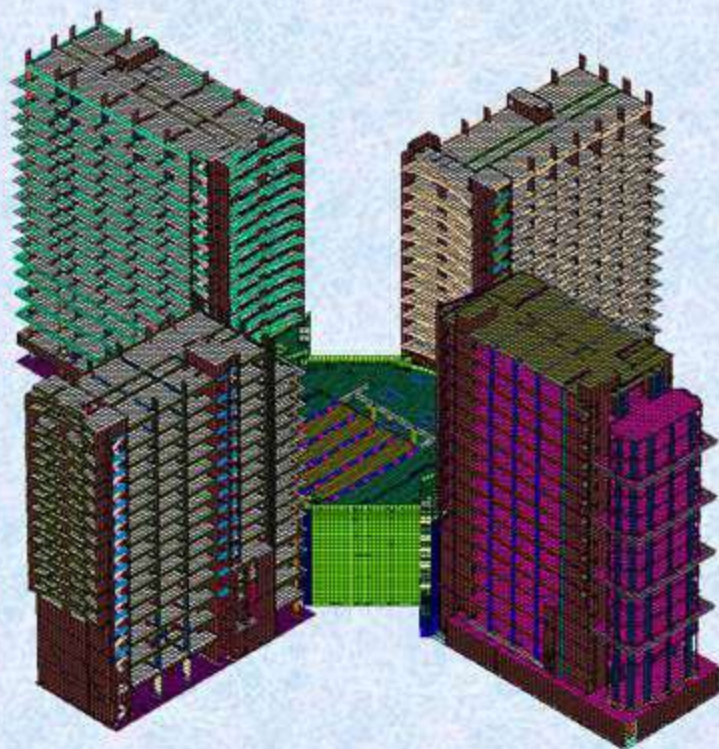
Покрытие имеет форму эллиптического купола. Каркас купола имеет треугольную сетку, образованную трубчатыми элементами системы кольцевых и перекрестных спиралевидных меридианных ферм.

Нижележащие конструкции – монолитный железобетонный каркас.

Расчетная модель в ПК STARK ES

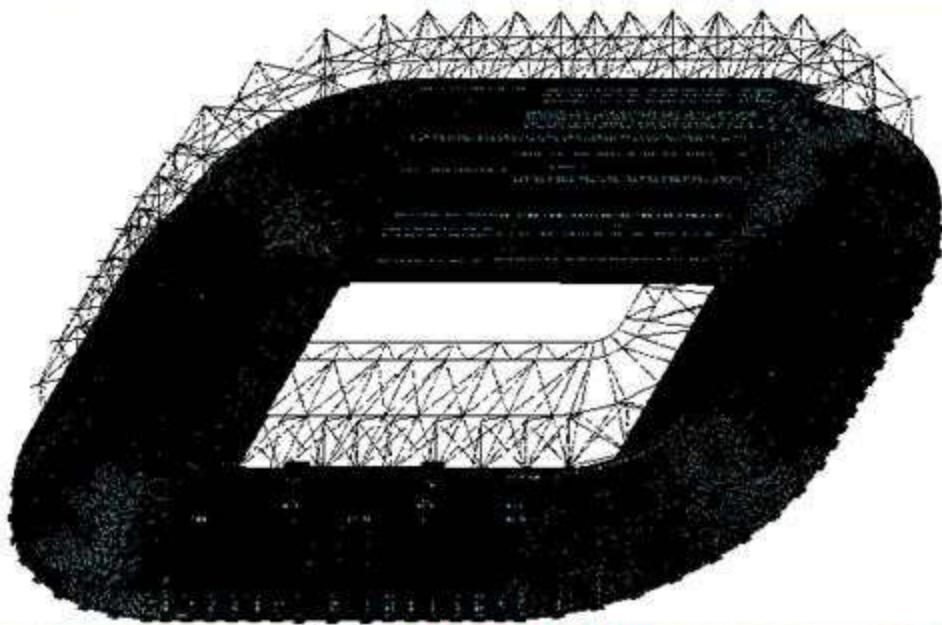


**Российский Международный Олимпийский Университет и  
Многофункциональный гостинично-рекреационный комплекс в г. Сочи  
(поверочный расчет и экспертиза на стадии «Проект»)**

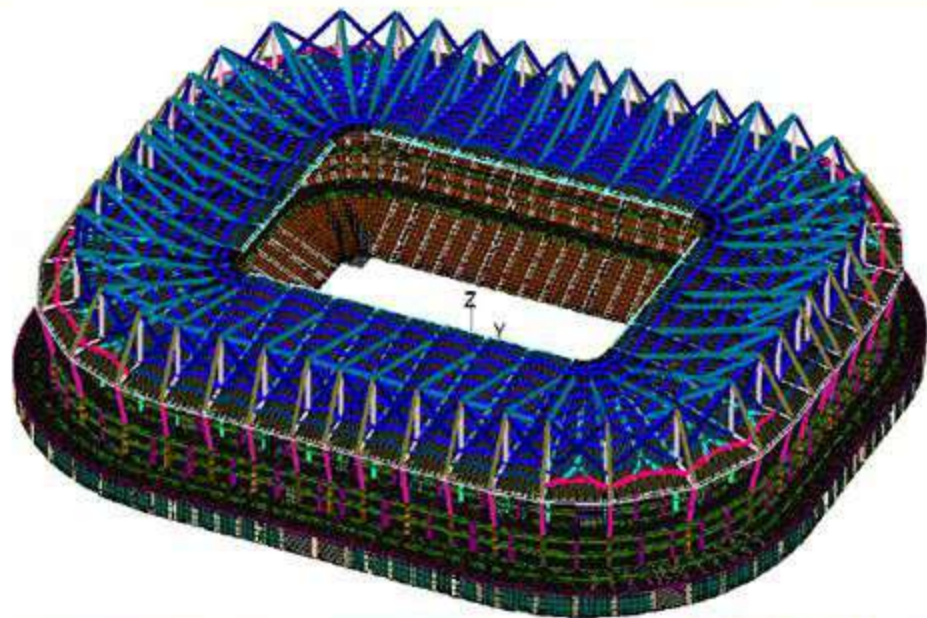


Расчетные модели в ПК STARK ES

# СТАДИОН на 45 тыс. зрителей в г. Ростов-на-Дону



Покрытие в ПК **Лири-САПР**



Общая модель стадиона в ПК **STARK ES**

# Расчетная и архитектурная модели здания аэровокзального комплекса аэропорта «Симферополь»



STARK ES

# Литература

1. Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий. – М.: Наука, 2012. – 414 с.
2. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
3. Themelis, S. Pushover analysis for seismic assessment and design of structures/ Ph.D. dissertation. – Heriot-Watt University, School of the Built Environment, 2008. – 261 p.
4. Будущее С.В., Джинчвелашвили Г.А., Колесников А.В. Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 5.
5. Wilson, E.L. Static & dynamic analysis of structures: a physical approach with emphasis on earthquake engineering. – Computers and Structures Inc, 2004. – 304 p.
6. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. СНиП II-7-81\*. – М.: Минстрой России, 2014. – 125 с.
7. Симбиркин В.Н., Филимонов А.В. Определение опасных направлений сейсмического воздействия для пространственных сооружений// Вестник НИЦ «Строительство». Исследования по теории сооружений: Сб. статей. Вып. 6 (XXXI) / под ред. И.И. Ведякова и Г.С. Варданяна. – М.: НИЦ «Строительство», 2012. – С. 23-30.
8. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Упрощенный нелинейный динамический расчет сооружений при сейсмических воздействиях// Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 5 (274). – С. 32-36.
9. Безделев В.В., Буклемшиев А.В., Сутьрин Ю.А. Предложения по корректировке СНиП «Строительство в сейсмических районах» в части формулирования спектрального метода расчета. Ч 1. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2000. – № 6. – С. 43-47.
10. Филимонов А.В. Учет ненайденных форм собственных колебаний при расчете реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия// Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 2. – С. 46-53.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**