

The logo for ARSS (Association for the Development of Steel Construction) features the letters 'А', 'Р', 'С', and 'С' in a stylized, grey, lattice-like font. The letters are arranged horizontally and are partially overlaid by a white geometric shape that extends from the top of the page.

АРСС

Ассоциация развития
стального строительства



METROPOLIS

Сергей Руднев

главный конструктор проекта компании «Метрополис»

Опыт проектирования уникальных зданий
с использованием стальных конструкций на примере
Театра оперы и балета в г. Севастополь

- Деконструктивистская архитектура в сейсмическом районе.
- Симбиоз железобетона и стали. Использование стальных конструкций при реализации сложных архитектурных форм.
- Особенности принятия принципиальных решений при разработке архитектурной концепции.
- Развитие и изменение конструктивных решений при адаптации проекта под отечественные нормы и традиции проектирования, изготовления и монтажа в процессе разработки проектной документации.

Команда проекта

Авторы архитектурного проекта
Coop Himmelb(l)au

Консультанты по конструктиву
Bollinger+Grohman

Генеральный проектировщик
METROPOLIS

Вместимость большого / малого залов
1 100 / 200 человек

Габаритные размеры здания в плане: 125x207 м

Максимальная отметка верха кровли: 37,660 м

Отметка пола наиболее заглубленного этажа: — 20,400 м

Общая площадь здания: 61 400 м²

Строительный объем: 225 400 м³

Количество этажей:
1 подземный, 1 подвальный, 8 надземных



Консольные свесы кровли

до 33 м

Вылет консольной террасы

35 м

Нормативная сейсмичность района строительства

9 баллов

Уровень ответственности

повышенный

(класс сооружения КС-3)

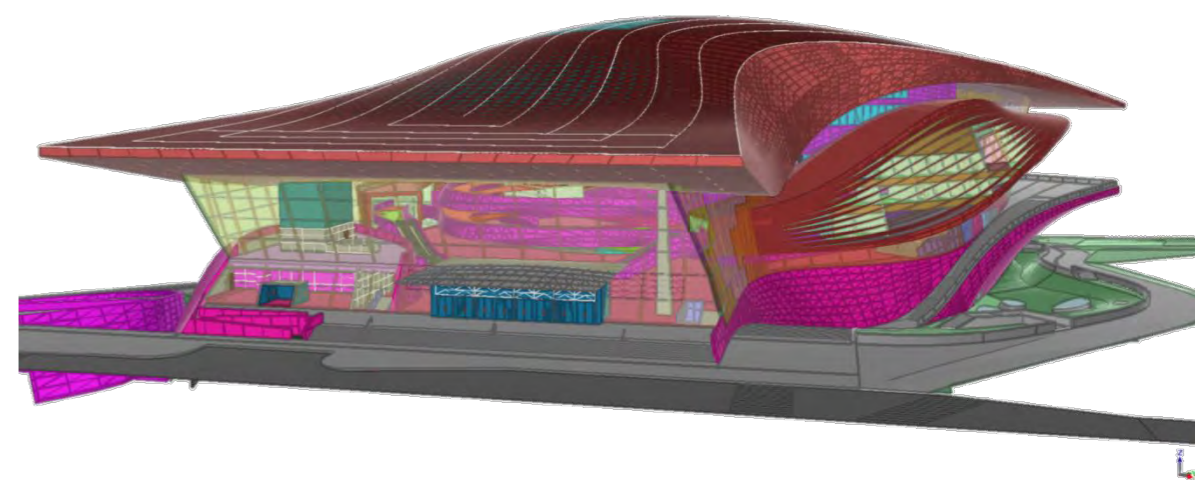
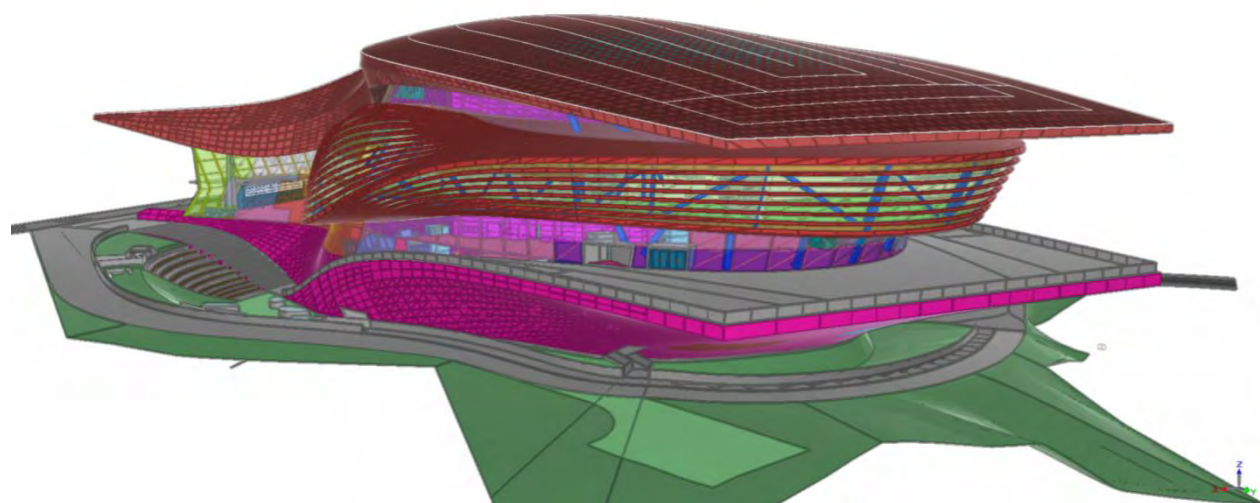
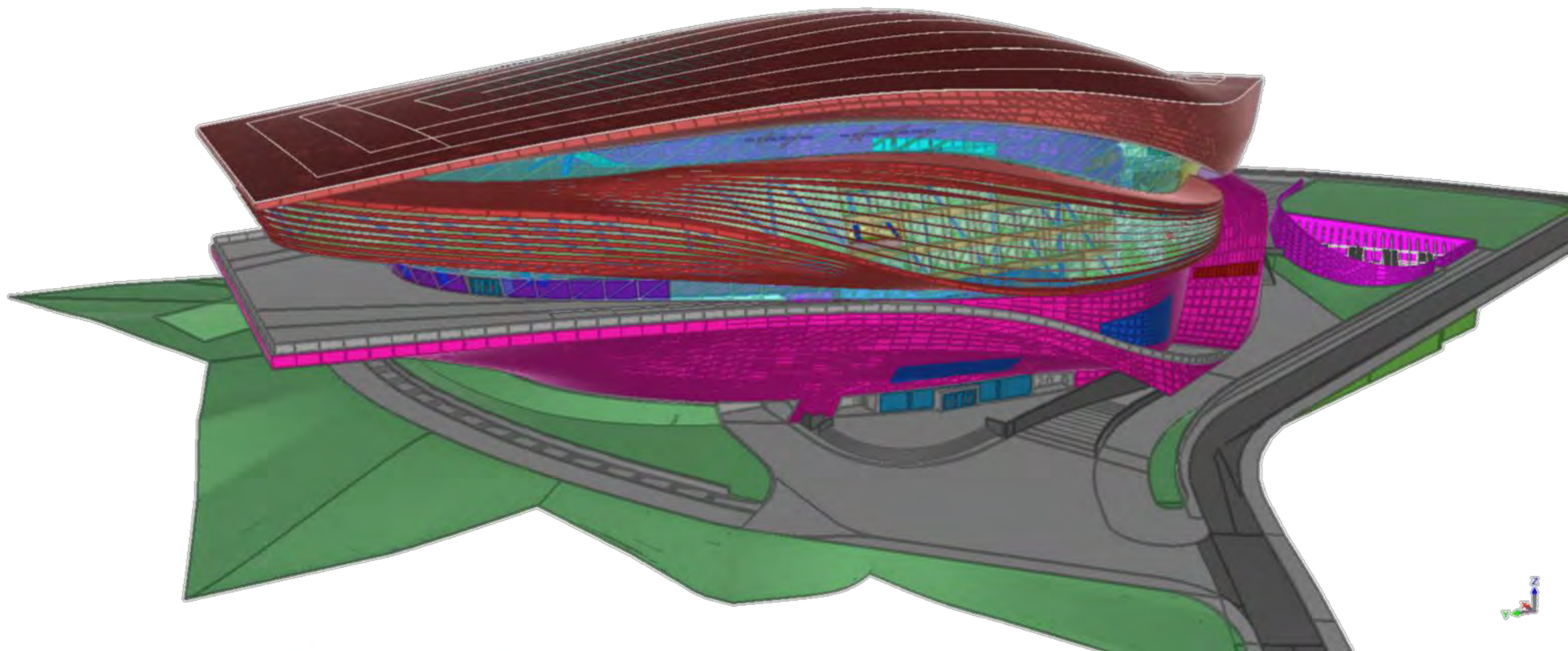
Глубина котлована

до 21 метра



Театр оперы и балета г. Севастополь

Театр оперы и балета г. Севастополь



Принятие принципиальных конструктивных решений

Автор архитектурного проекта

COOPHIMMELB(L)AU

Wolf D. Prix & Partner ZT GmbH



Grasshopper
ALGORITHMIC MODELING FOR RHINO

Karamba.3D
parametric engineering

BOLLINGER+GROHMANN

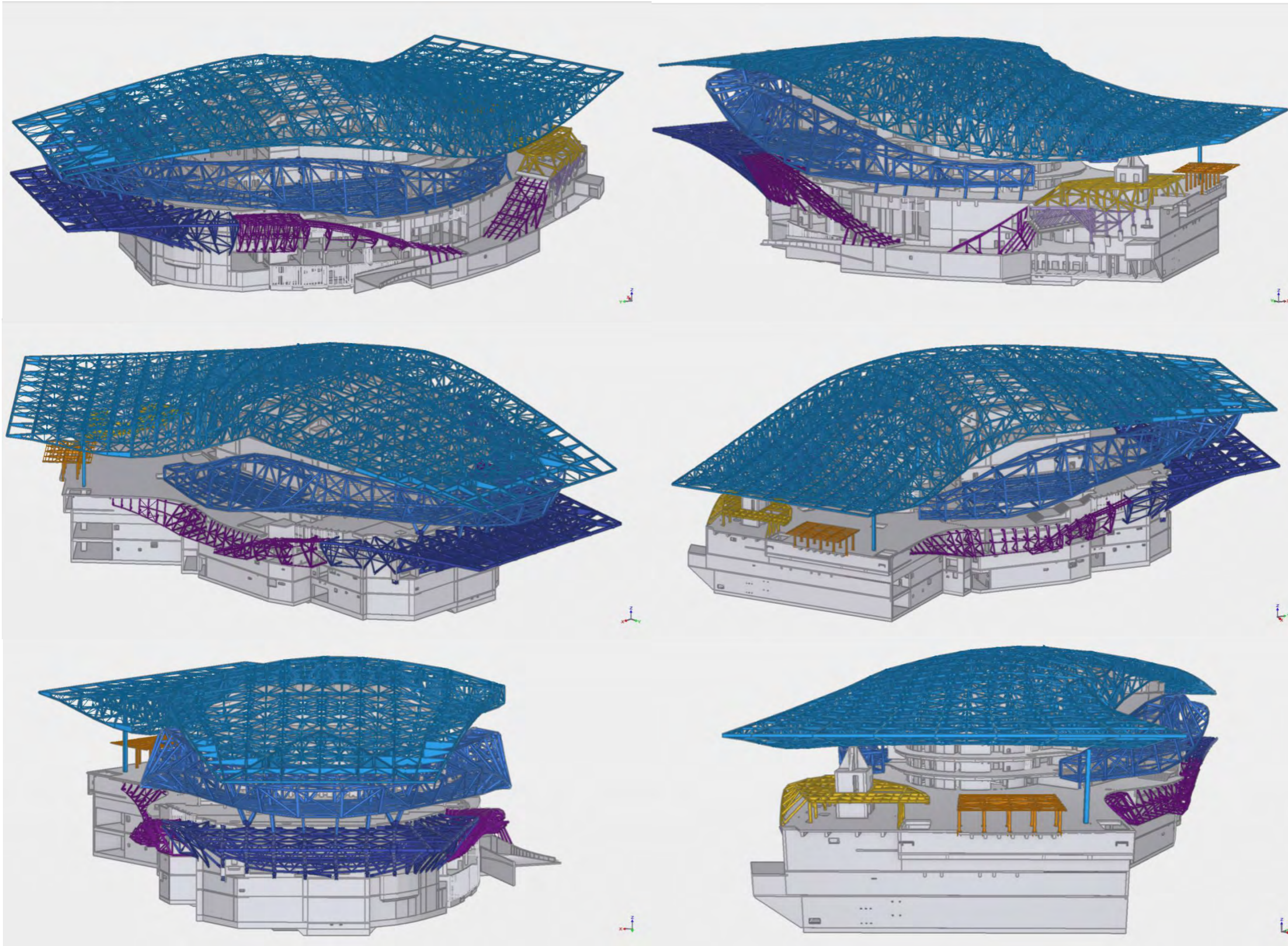
Стадия SD (Schematic Design)
Стадия DD (Design Development)

METROPOLIS

Стадия П (проектная документация)

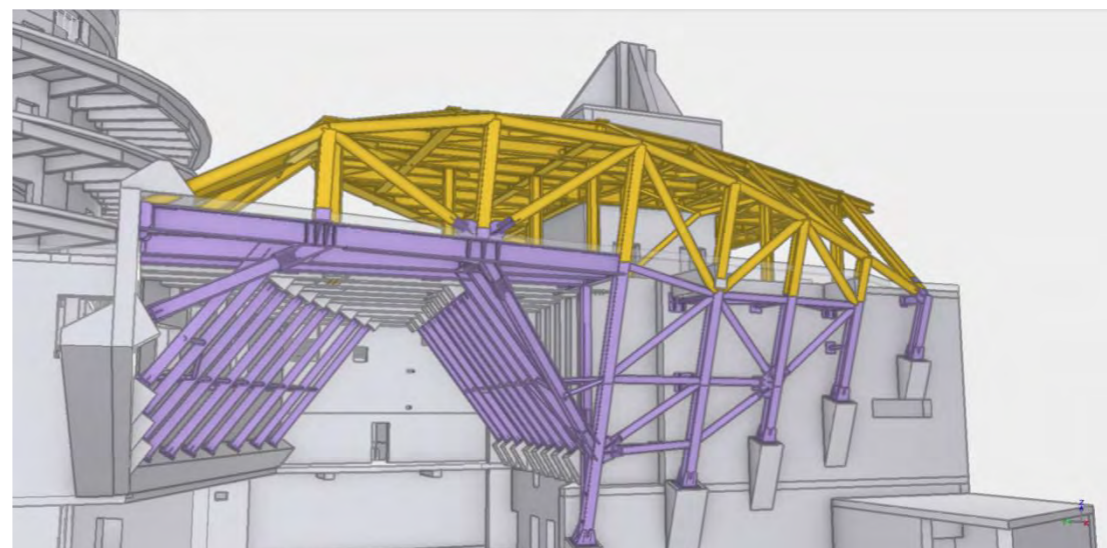
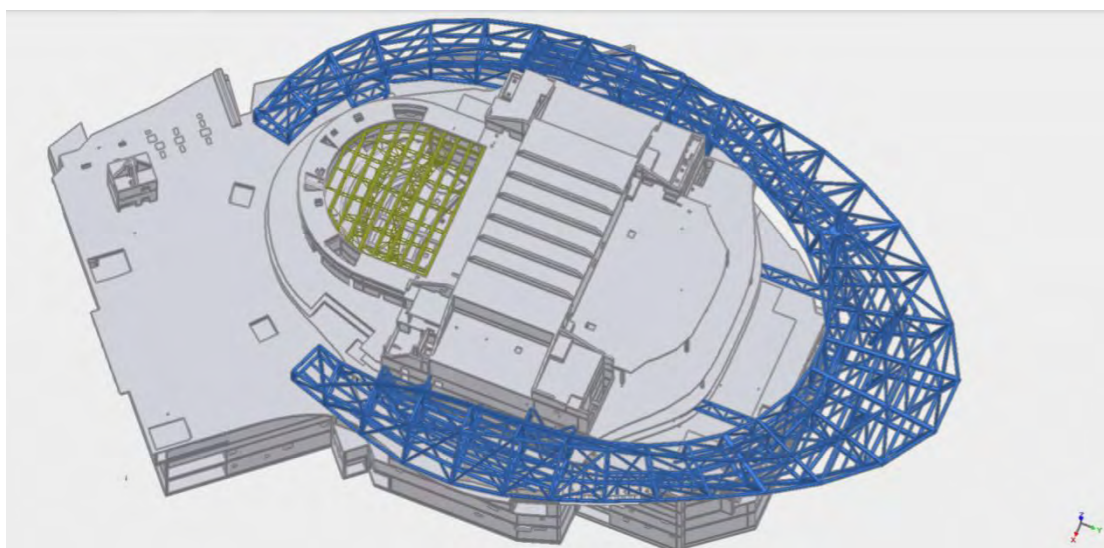
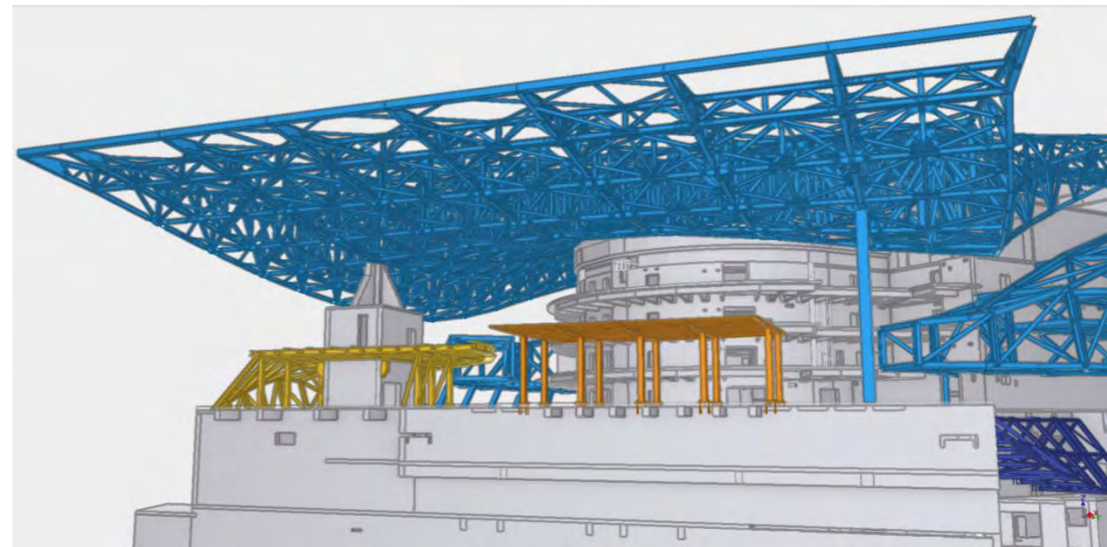
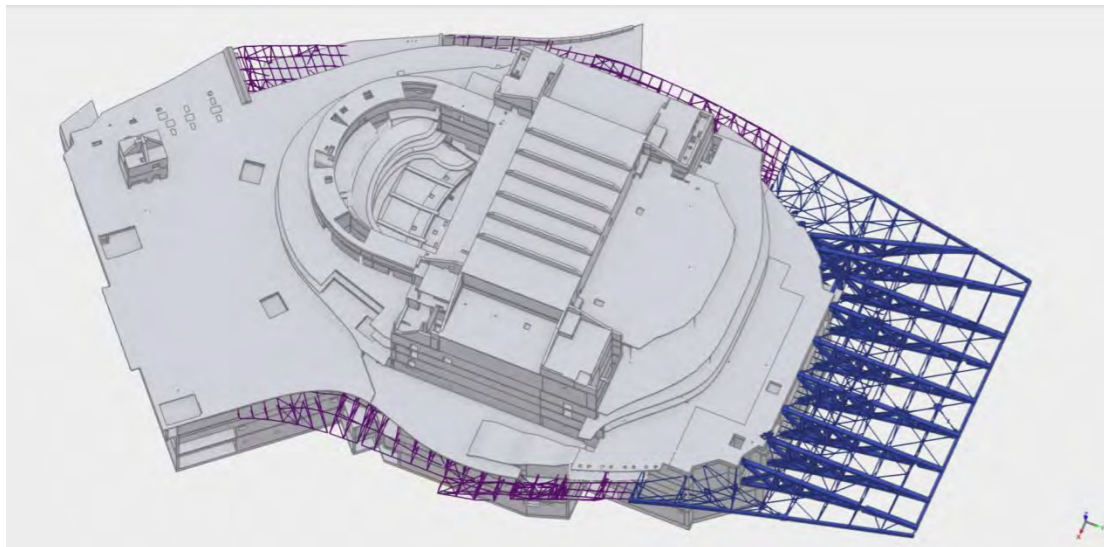
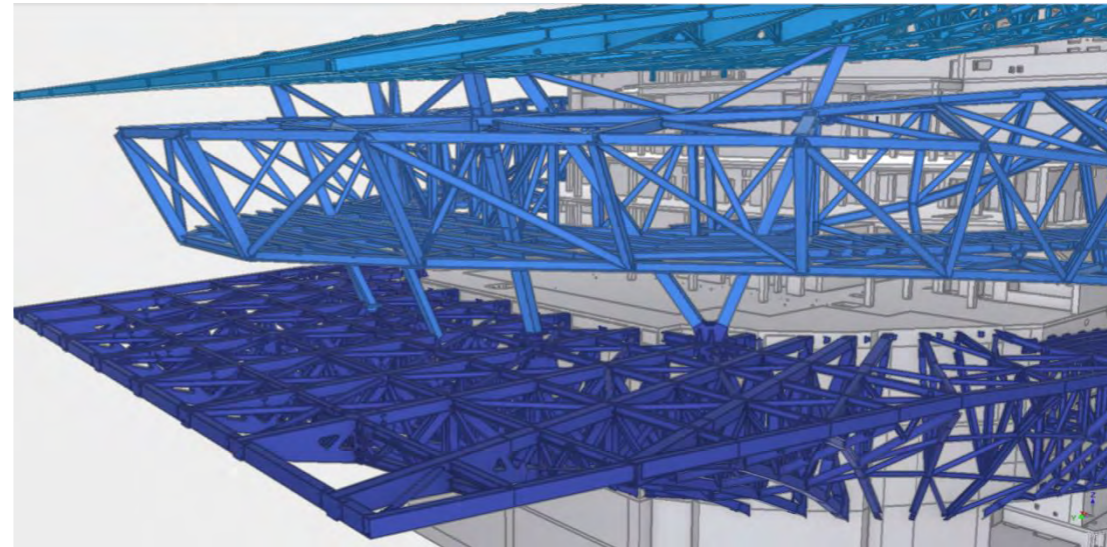
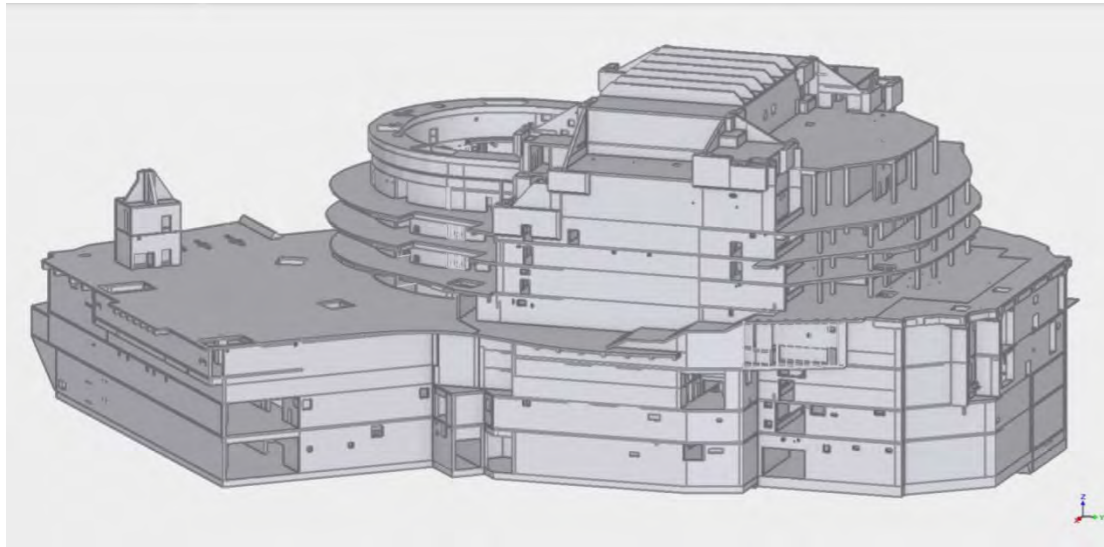
Основные несущие конструкции. Общие виды

Общий вес стальных конструкций
(С355, С440) – около 13 000 т
Объем бетона – около 63 000 м³



Железобетон	63 000 м ³
Кровля	4500 т
Пояс	4500 т
Консоль	2700 т
Цоколь	550 т
Арки малого фойе	80 т
Перекрытие буфета	380 т
Входная группа	50 т
Фермы над главным залом	290 т

Основные несущие конструкции. Фрагменты



Железобетон
63 000 м³

Кровля
4500 т

Пояс
4500 т

Консоль
2700 т

Цоколь
550 т

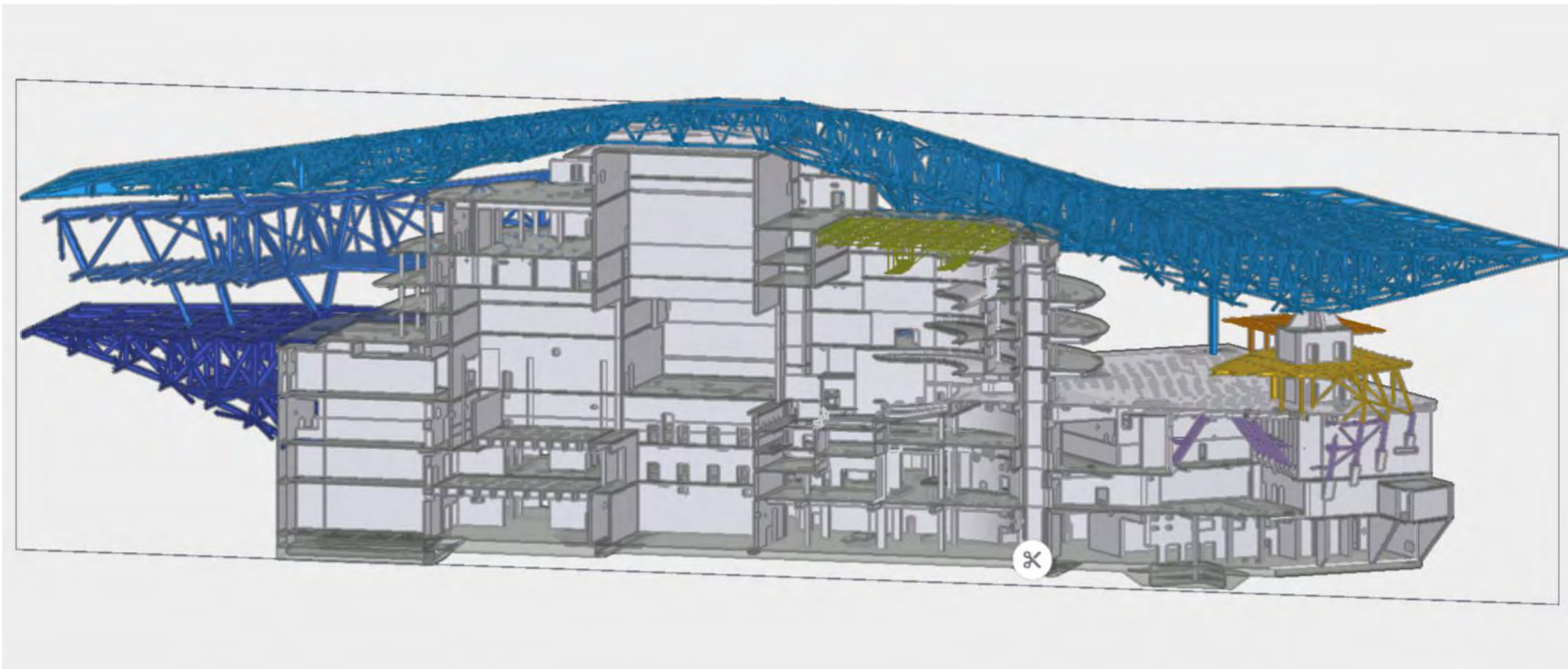
Арки малого
фойе
80 т

Перекрытие
буфета
380 т

Входная
группа
50 т

Фермы над
главным
залом
290 т

Основные несущие конструкции. Разрезы



Железобетон
63 000 м³

Кровля
4500 т

Пояс
4500 т

Консоль
2700 т

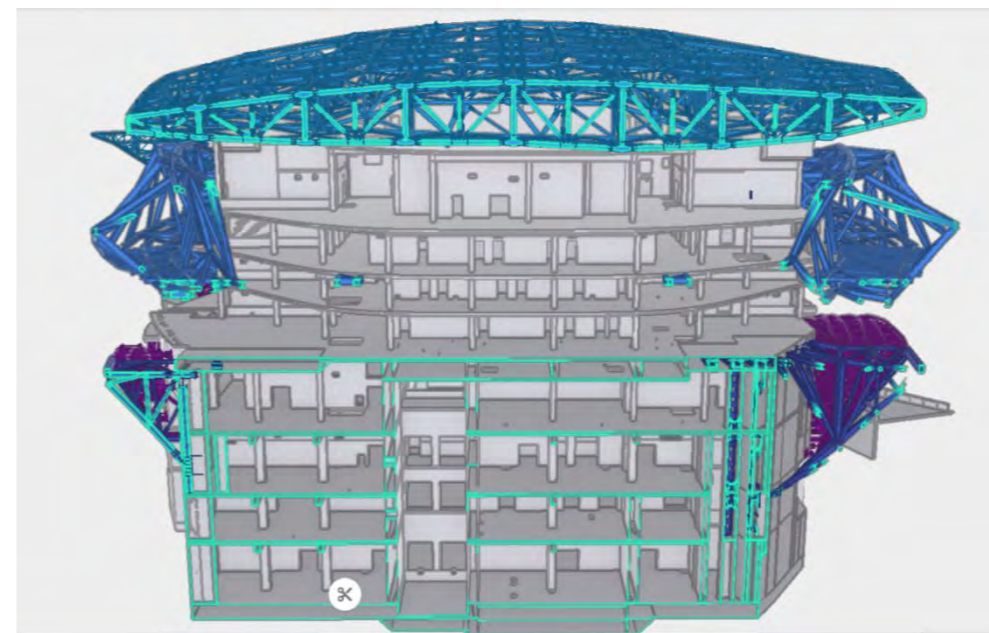
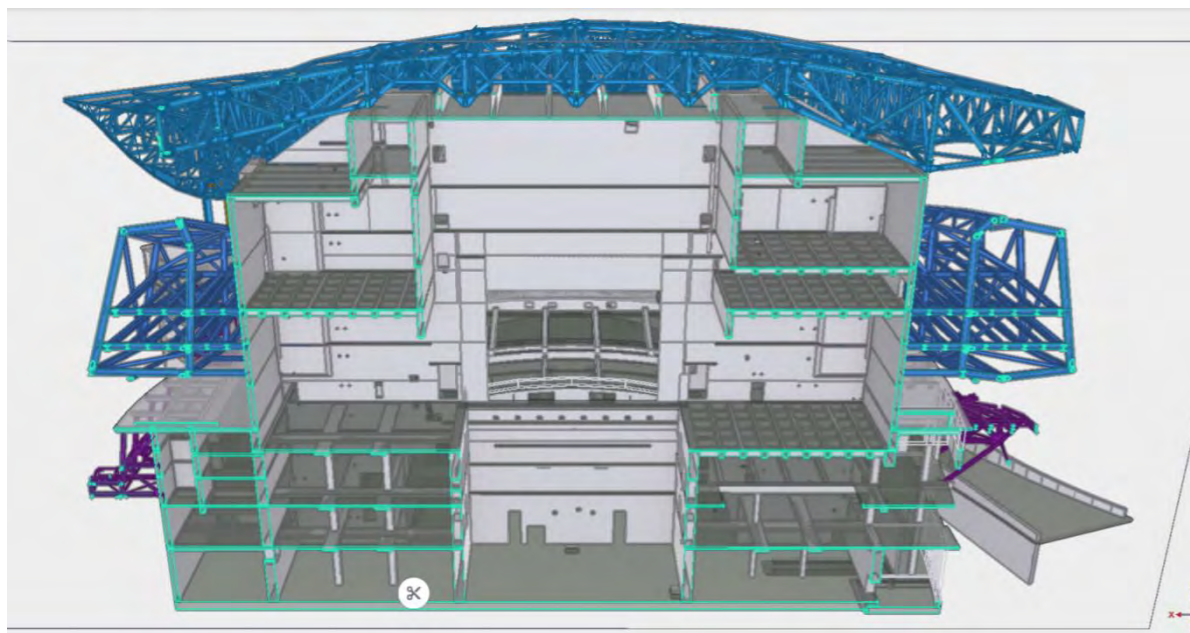
Цоколь
550 т

Арки малого
фойе
80 т

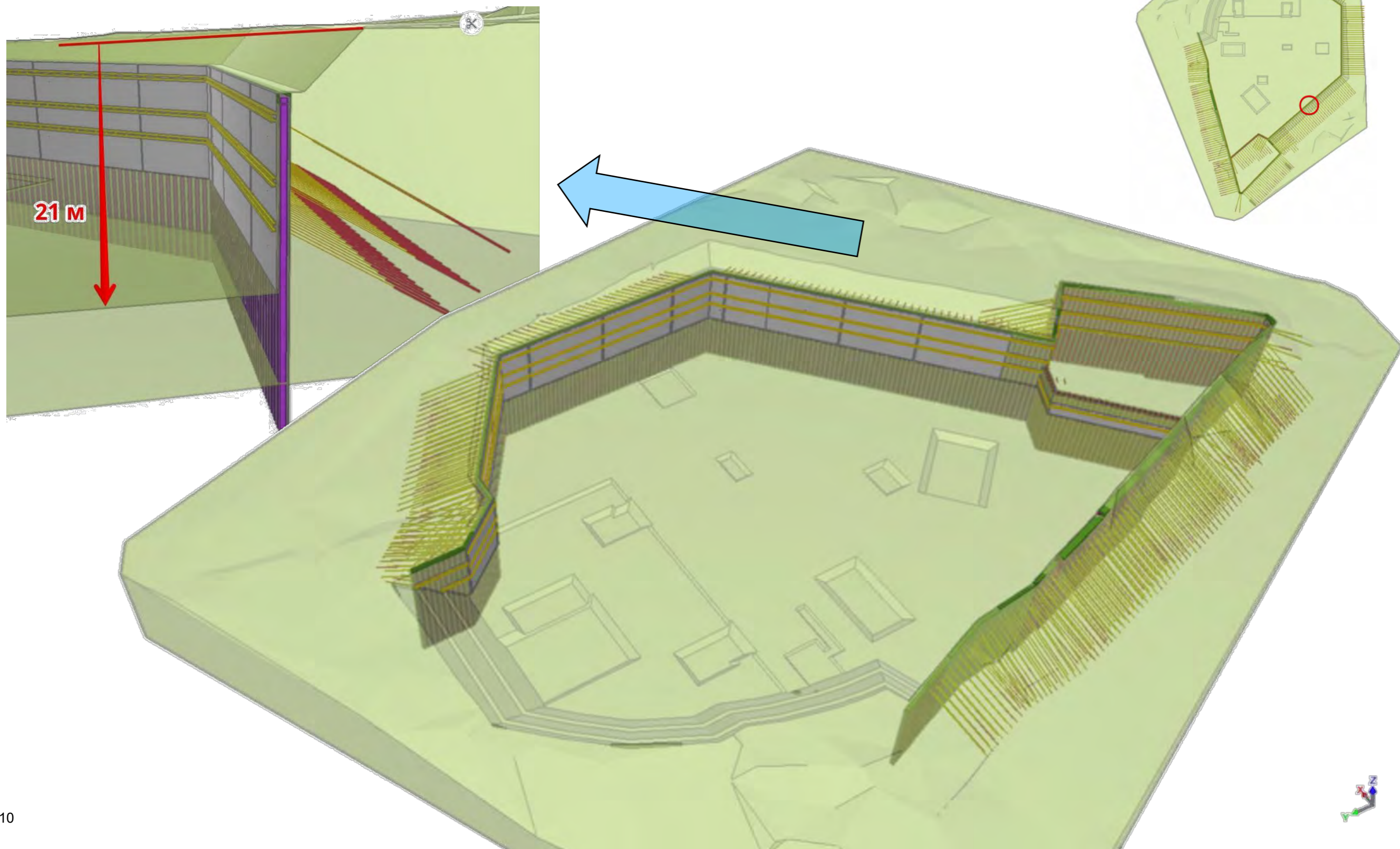
Перекрытие
буфета
380 т

Входная
группа
50 т

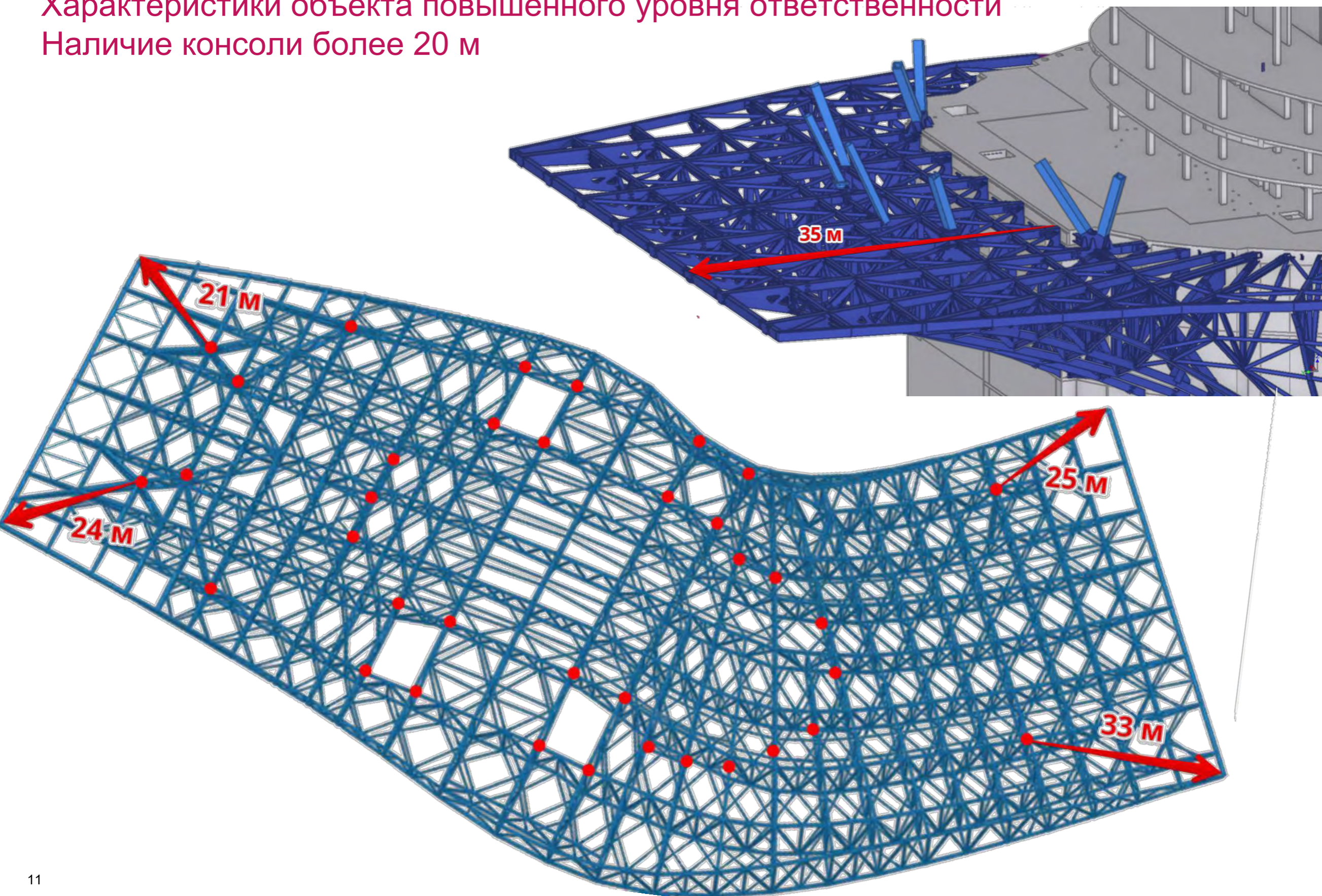
Фермы над
главным
залом
290 т



Характеристики объекта повышенного уровня ответственности
Заглубление подземной части (полностью или частично) более 15 м

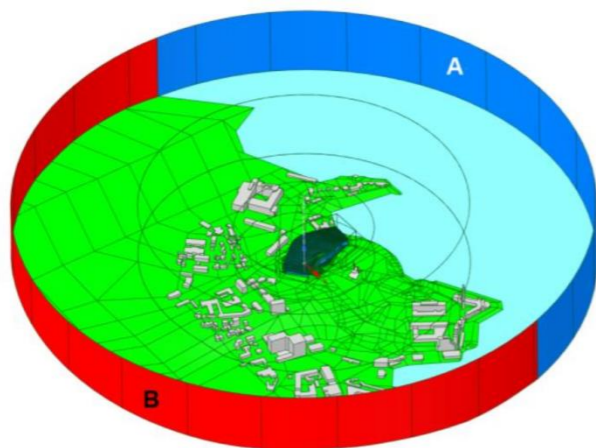


Характеристики объекта повышенного уровня ответственности
Наличие консоли более 20 м

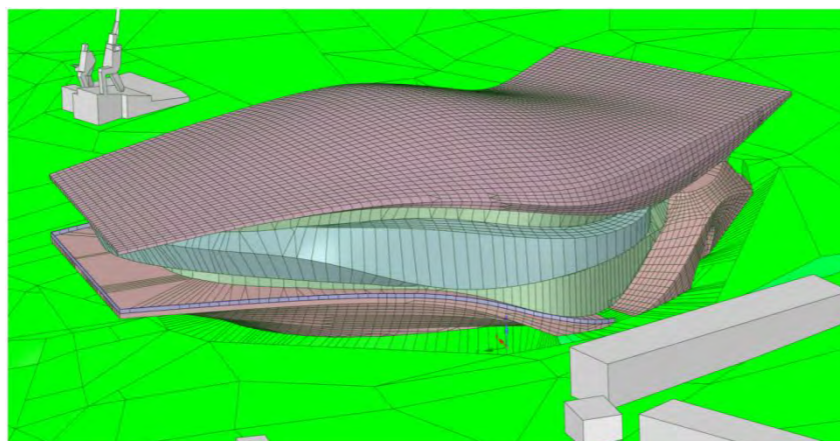


Комплексные аэродинамические исследования – НИЦ Стадио

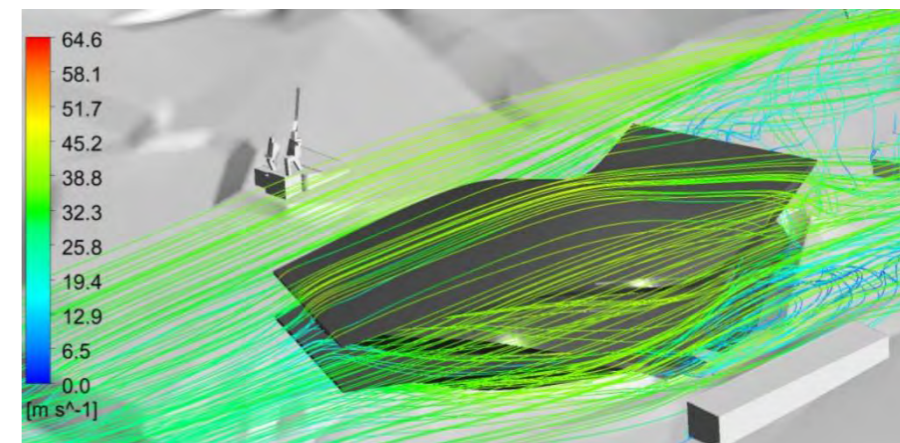
Определение ветровых нагрузок



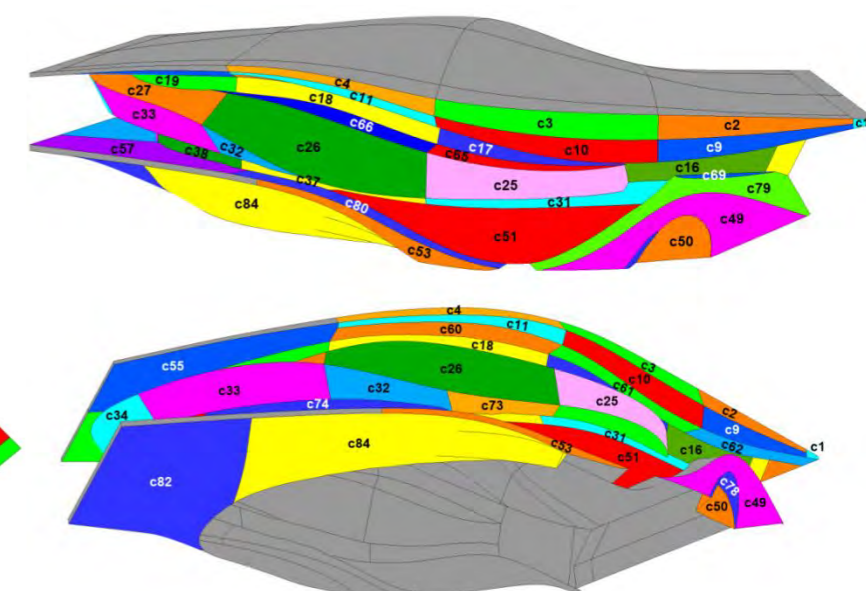
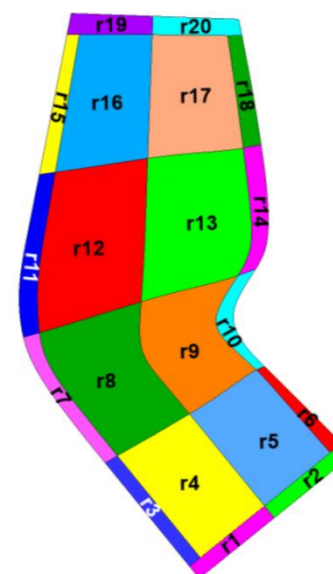
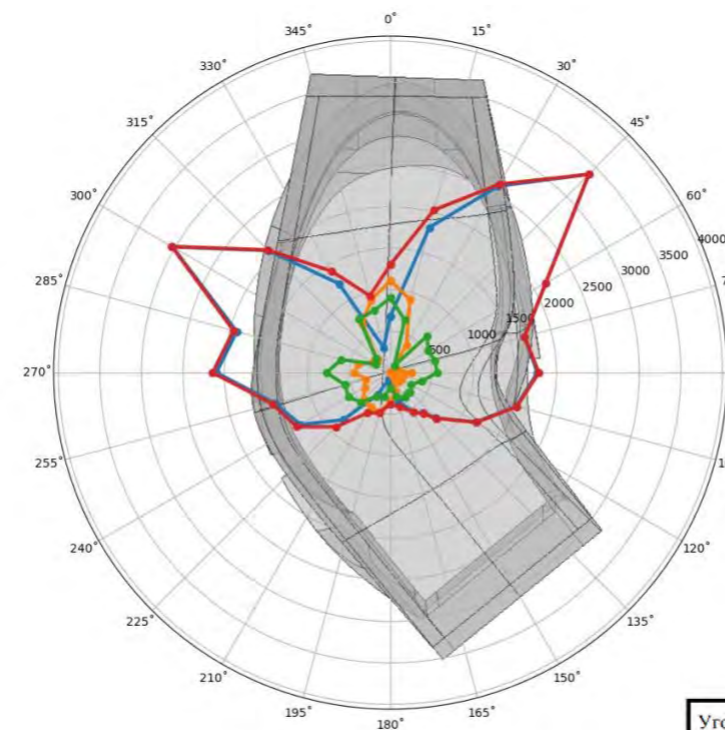
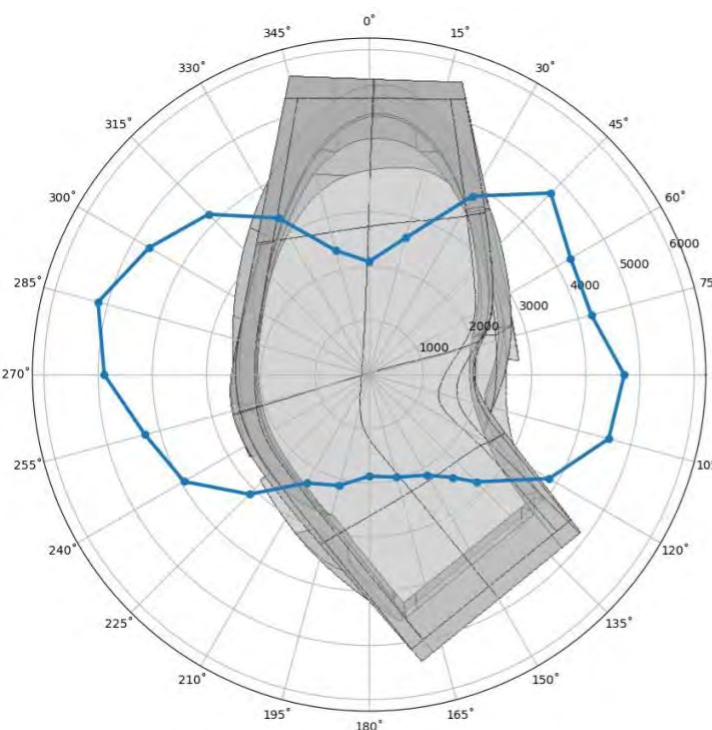
Общий вид геометрической модели. Схема назначения типов местности



Геометрическая модель. Вид вблизи театра



Линии тока ветра, м/с (направление 0°, северный)



Схемы компонент для сбора аэродинамических нагрузок

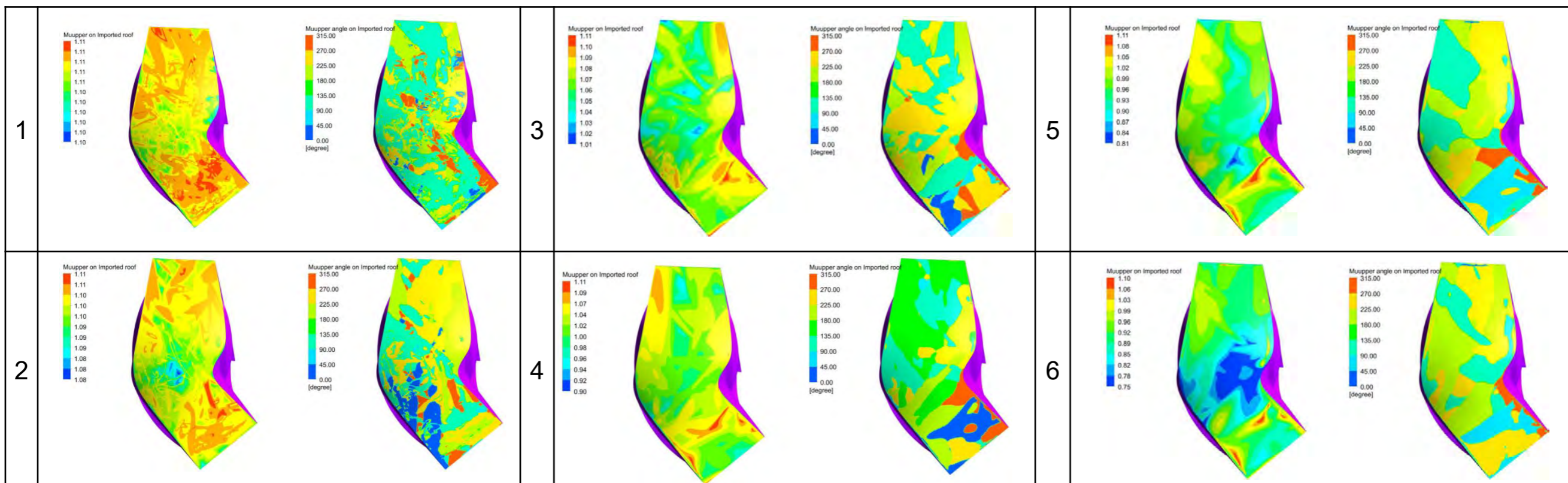
Таблица 5.2. Средняя составляющая ветрового давления (P, Па) для компонент Театра

Угол атаки ветра, °	№ Компоненты (рис. 5.2)																			
	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12	r13	r14	r15	r16	r17	r18	r19	r20
0°	-39	-125	-133	30	-94	-708	-221	-175	-215	-316	-263	-231	-185	-179	-55	-10	-22	-38	-371	-414
15°	-48	-168	-168	-54	-280	-601	-261	-215	-315	-468	-215	-247	-166	-168	-44	-24	15	-143	-252	-398
30°	-55	-215	-130	-132	-456	-688	-340	-307	-427	-590	-256	-312	-225	-316	-188	-98	-32	-422	-161	-349
45°	-75	-200	155	167	396	830	393	369	483	783	355	381	326	521	295	176	140	696	121	285
60°	-142	-224	-172	-191	-333	-750	-311	-326	-428	-677	-215	-302	-302	-511	-194	-161	-190	-701	-88	-214
75°	-257	-229	-206	-215	-245	-638	-248	-355	-435	-739	-187	-291	-306	-595	-187	-179	-195	-441	-106	-157
90°	-354	-310	-218	-217	-182	-487	-302	-384	-435	-750	-185	-292	-418	-841	-186	-202	-269	-567	-159	-230

Суммарные ветровые нагрузки в зависимости от направления ветра

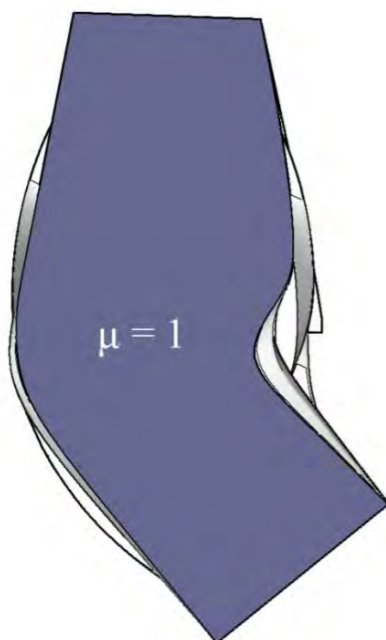
Комплексные аэродинамические исследования – НИЦ Стадио

Определение снеговых нагрузок

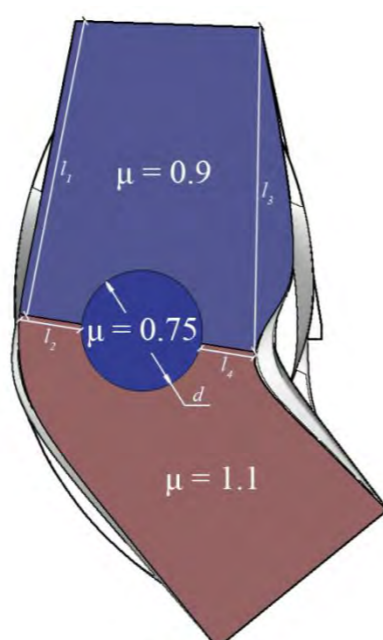


Изополя (слева) верхней огибающей максимальных значений коэффициента формы и углов (справа) ее реализации для рассмотренных расчетных случаев

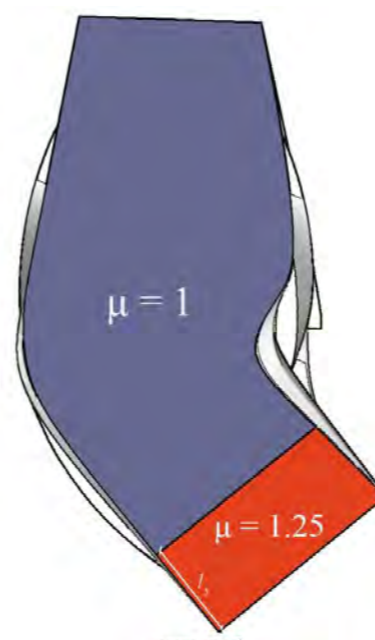
Коэффициенты
формы
для покрытия
(варианты)



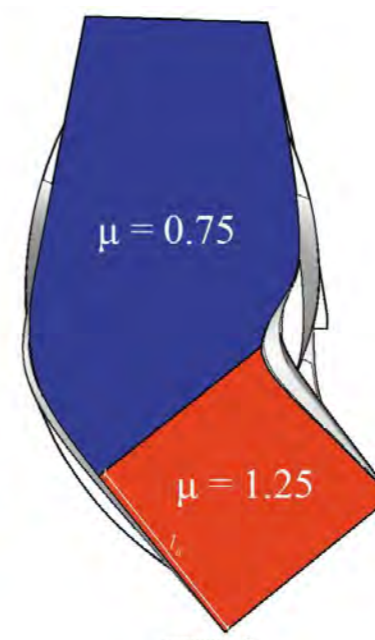
вариант 1



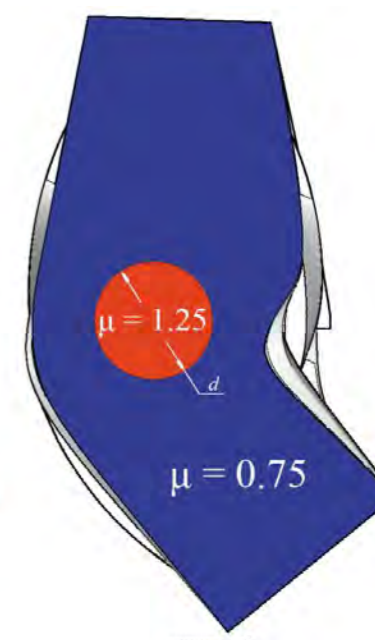
вариант 2



вариант 3

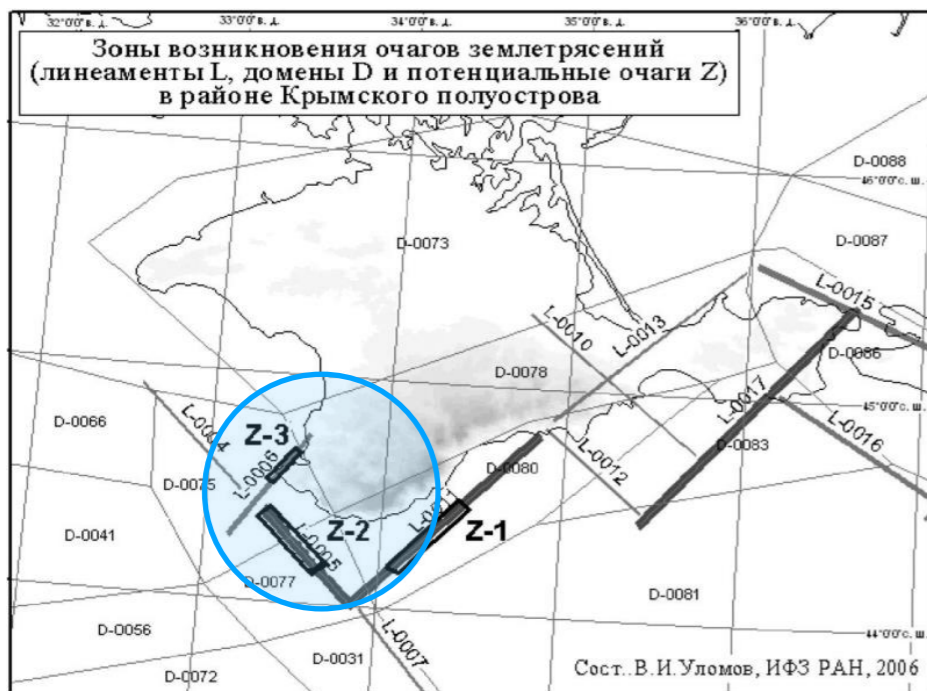


вариант 4



вариант 5

Определение сейсмических воздействий – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта



Сейсмогенерирующие структуры: линементы (черные линии) и домены (границы – тонкие линии)



Очаги сценарных землетрясений Z1, Z2, Z3 (черные кружки)

Определены местоположение и сейсмологические параметры потенциальных очагов землетрясений.

Рассчитаны параметры колебаний на поверхности трех типовых грунтовых разрезов на уровне заложения фундамента при сценарных землетрясениях. Расчетная сейсмичность площадки строительства – 8,32 балла.

Таблица 1. Очаговые параметры сценарных землетрясений для изучаемого объекта в г. Севастополь, в соответствии с картой ОСР-2015-В.

Номер линеамента и домена в базе ОСР-2015	Магнитуда Ms	Координаты эпицентра		Глубина гипоцентра, Км	Ориентировка очага		Размеры очага, км	
		°с.ш.	°в. д.		Простирание	Падение	длина	ширина
L0005 (Z1)	7.0	44.372	33.378	15,0	127°	90°	50	20
L0006 (Z2)	6.5	44.602	33.434	9,5	222°	90°	25	10
D0075 (Z3)	5.5	44.583	33.514	4,5	-	-	5	3

Таблица 2. Параметры колебаний на поверхности скалы и на поверхности 3-х типовых грунтовых разрезов на площадке строительства Театра оперы и балета в г. Севастополь в Крыму при сценарных землетрясениях.

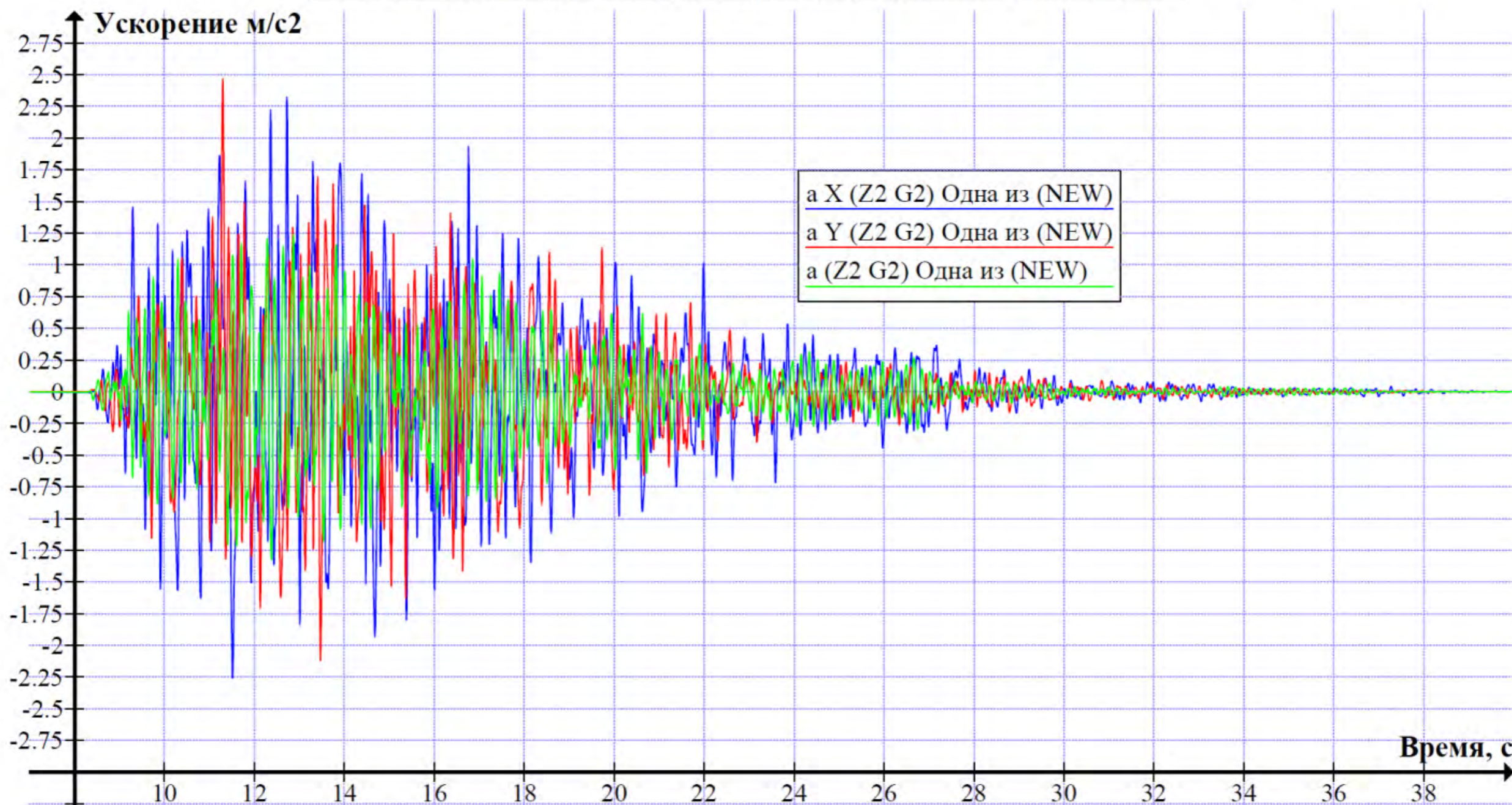
Сценарное землетрясение	Эпицентр, км	Гипоцентр, км	Ускорение, см/с ²		Скорость, см/с		d, с	Период, с			
			a ₁	a ₂	v ₁	v ₂		T _{a1}	T _{a2}	T _{v1}	T _{v2}
Z1	28,2	32,0	56÷76	118÷152 134÷168 120÷146	6÷8	9÷12 10÷13 9÷13	8÷12	2,05	0,45 0,49 0,51	10,24	10,24 10,24 10,24
Z2	6,5	11,5	124÷148	208÷238 230÷250 204÷226	13÷16	19÷23 19÷23 19÷23	7÷9	1,46	0,47 0,51 0,51	10,24	5,12 5,12 10,24
Z3	3,5	5,7	114÷134	186÷214 182÷232 183÷207	6÷8	12÷16 13÷16 12÷16	2÷3	0,37	0,45 0,51 0,51	2,05	0,47 0,51 0,51

a₁, v₁ – максимальное ускорение и скорость колебаний на поверхности скалы, a₂, v₂ – максимальное ускорение и скорость колебаний на поверхности грунта; d – характерная длительность колебаний; T_{a1}, T_{a2}, T_{v1}, T_{v2} – характерные периоды колебаний (ускорения и скорости) на скале и на поверхности грунта.

Определение сейсмических воздействий – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

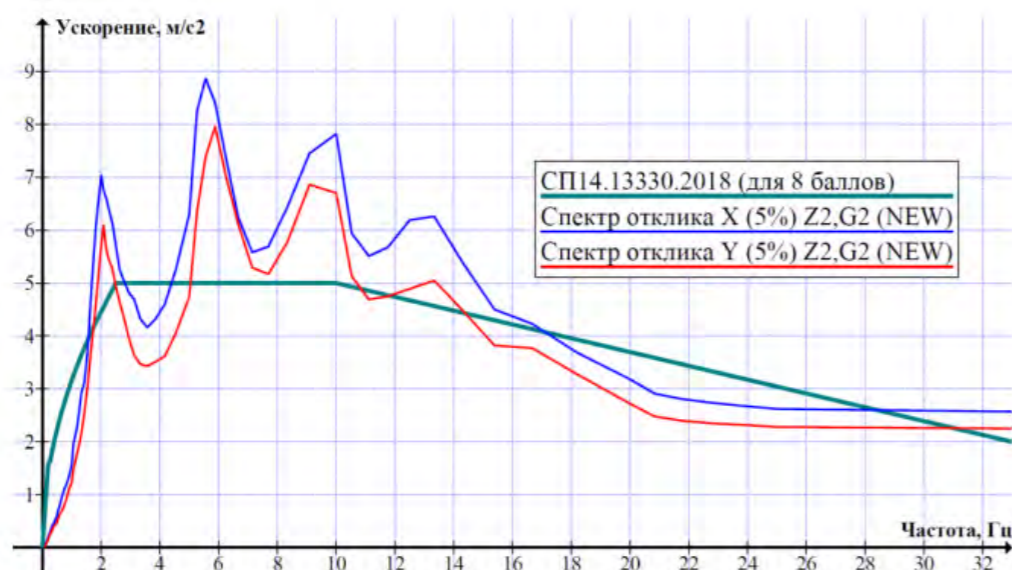
Рассчитаны акселерограммы колебаний на поверхности трех типовых грунтовых разрезов на уровне заложения фундамента при сценарных землетрясениях.

Сценарное землетрясение **Z2**, грунтовый разрез на площадке строительства **G2**



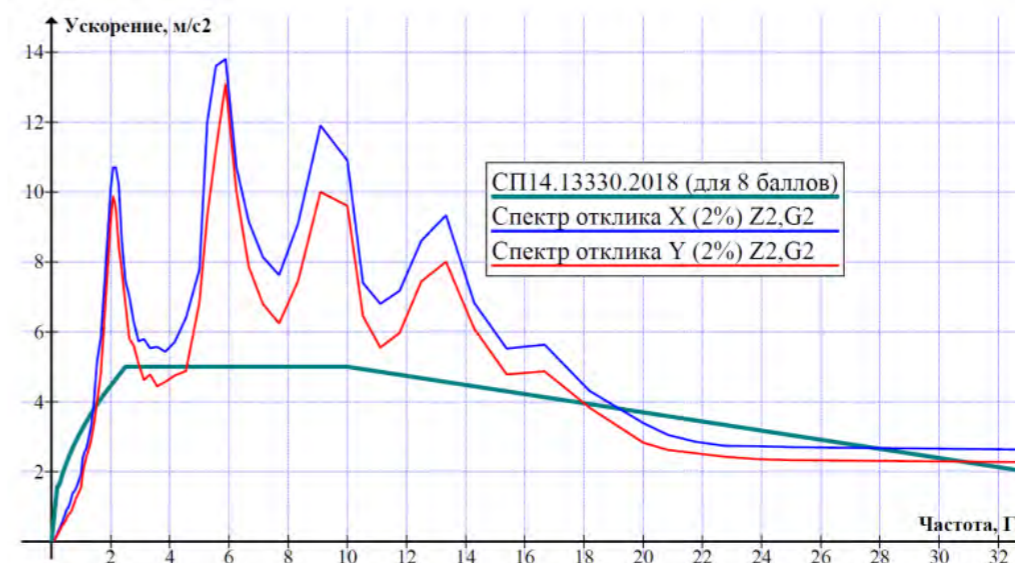
Определение сейсмических воздействий – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Получены спектры реакции (ответа) в ускорениях при 5%-ом и 2%-ом затухании (для ж/б и металлических конструкций соответственно).



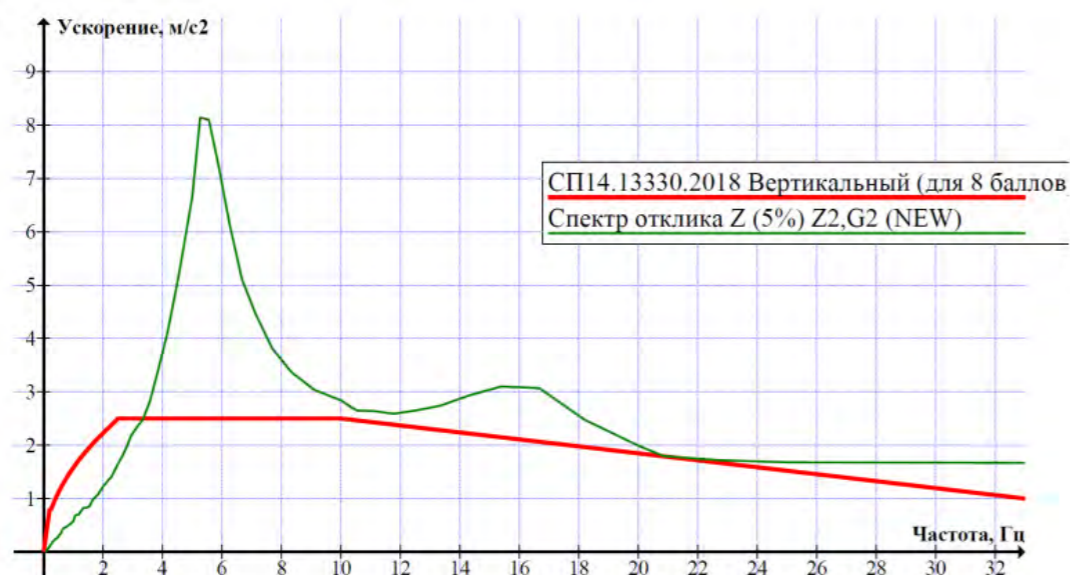
Сценарное землетрясение Z2, грунтовый разрез на площадке строительства G2

Рис. 1 Горизонтальные спектры реакции, 5% демпфирование. В качестве расчетного для железобетонных конструкций следует принимать Спектр X 5% Z2,G2



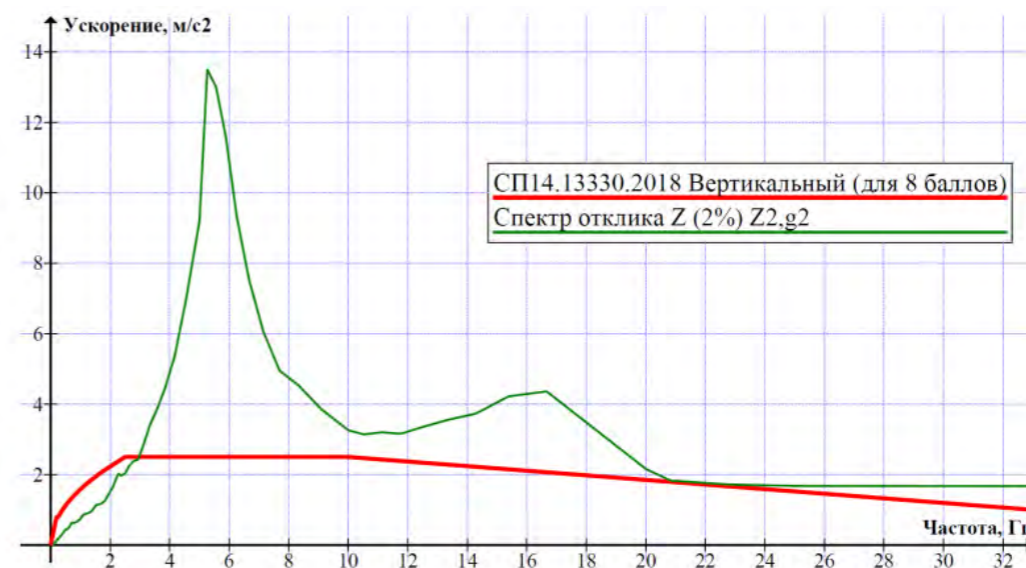
Сценарное землетрясение Z2, грунтовый разрез на площадке строительства G2

Рис. 3 Горизонтальные спектры реакции, 2% демпфирование. В качестве расчетного для металлических конструкций следует принимать Спектр X 2% Z2,G2



Сценарное землетрясение Z2, грунтовый разрез на площадке строительства G2

Рис. 2 Вертикальные спектры реакции, 5% демпфирование. В качестве расчетного для железобетонных конструкций следует принимать Спектр Z 5% Z2,G2



Сценарное землетрясение Z2, грунтовый разрез на площадке строительства G2

Рис. 4 Вертикальный спектр реакции, 2% демпфирование. В качестве расчетного для металлических конструкций следует принимать Спектр Z 2% Z2,G2

Определение сейсмических воздействий

Собственные частоты и формы колебаний			
№ собственной формы	ЗАО НИЦ СтаДиО ANSYS Mechanical	ООО «МЕТРОПОЛИС» ЛИРА-САПР	Δ, % ANSYS / ЛИРА-САПР
<i>Собственные частоты системы (на жестком основании с учетом массы от нормативного собственного веса несущих конструкций)</i>			
1-я форма собственных колебаний. Частота, Гц	2.309 Гц	2.258 Гц	1.3 %
2-я форма собственных колебаний. Частота, Гц	2.390 Гц	2.285 Гц	5.5 %
3-я форма собственных колебаний. Частота, Гц	2.489 Гц	2.372 Гц	4.7 %
4-я форма собственных колебаний. Частота, Гц	2.559 Гц	2.605 Гц	1.8 %
5-я форма собственных колебаний. Частота, Гц	2.841 Гц	2.831 Гц	0.3 %

Частоты и формы колебаний конструкции на динамическом основании и учетом конвертации расчетных нагрузок в массы (0.9SW, 0.8DL, 0.5LL)

Частоты собственных колебаний конструкций Театра оперы и балета

№ п/п	Частота, Гц	Элемент конструкции
1	1.5687	Покрытие над главным зрительным залом
2	1.6600	Основное покрытие (участок в осях 1.1–10.1/А.1)
3	1.6767	Покрытие над главным зрительным залом
4	1.7692	Покрытие над главным зрительным залом
5	1.7994	Основное покрытие (участок в осях 1–10/А)
6	1.8476	Основное покрытие + пояс
7	1.8618	Покрытие над главным зрительным залом
8	1.8799	Основное покрытие (участок в осях 1–10/А)
9	1.9341	Основное покрытие + пояс + консольная терраса
10	2.0991	Покрытие над главным зрительным залом
11	2.1208	Основное покрытие (участок в осях 1–10/А)
12	2.1746	Основное покрытие + консольная терраса
13	2.2216	Основное покрытие (участок в осях 1.1–10.1/А.1)
14	2.2295	Покрытие над главным зрительным залом
15	2.2462	Конструкция консольной террасы
16	2.4968	Покрытие над главным зрительным залом
17	2.5014	Конструкция консольной террасы
18	2.5187	Цоколь. Балки перекрытия в осях А.1-Г.1/11-6.1
19	2.5439	Конструкции пояса
20	2.7711	Конструкции пояса

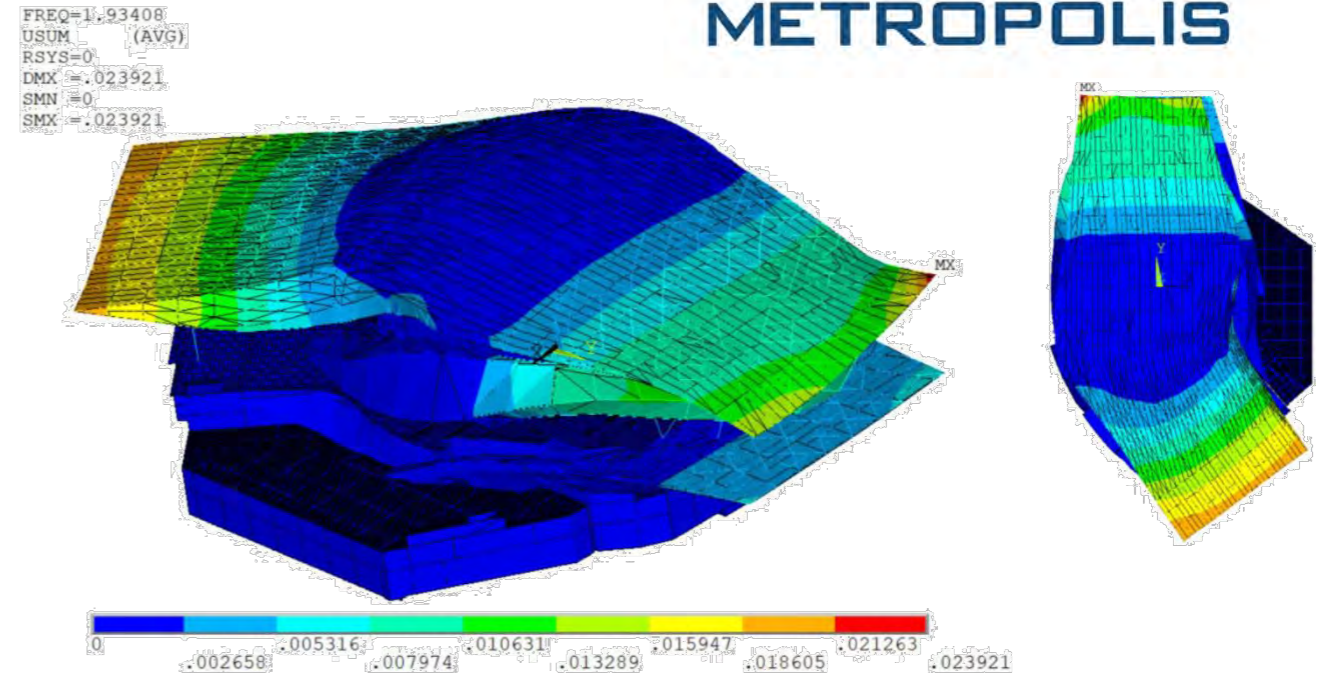


Рис. П2.15. 9-ая форма собственных колебаний, $f_9=1,934$ Гц. С учетом конвертации расчетных нагрузок в массы (0.9SW, 0.8DL, 0.5LL).

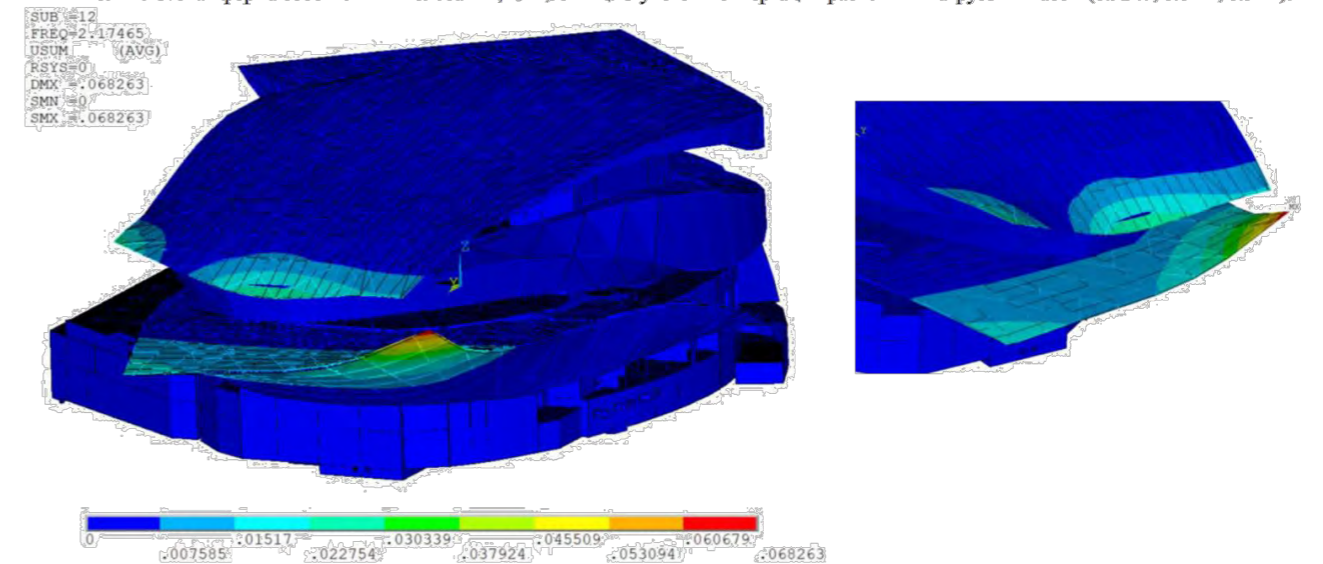


Рис. П2.17. 12-ая форма собственных колебаний, $f_{12}=2,175$ Гц. С учетом конвертации расчетных нагрузок в массы (0.9SW, 0.8DL, 0.5LL).

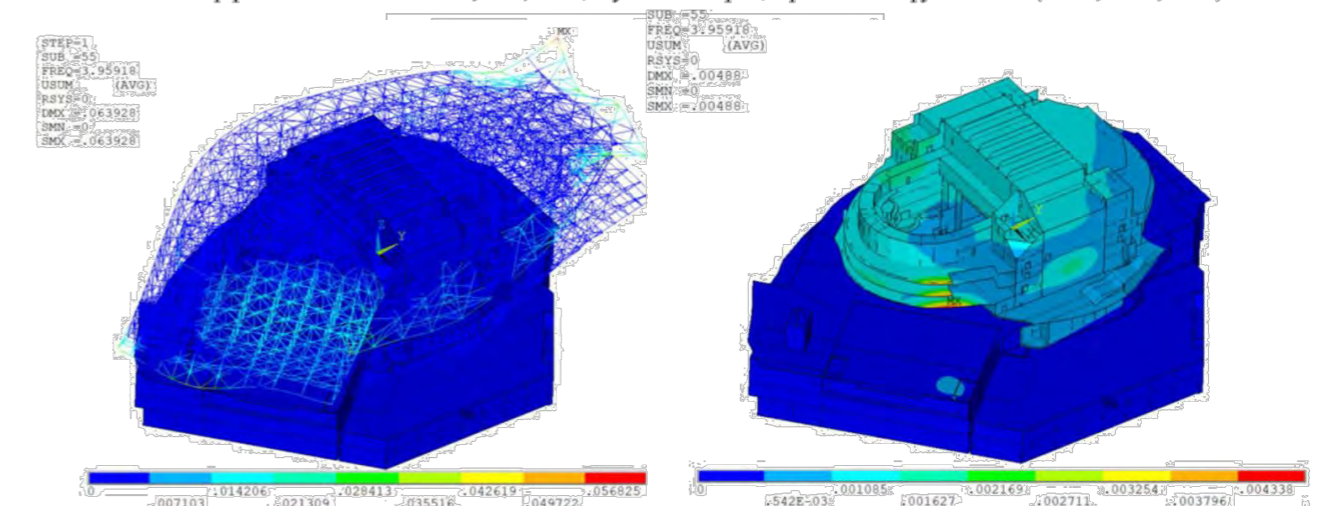
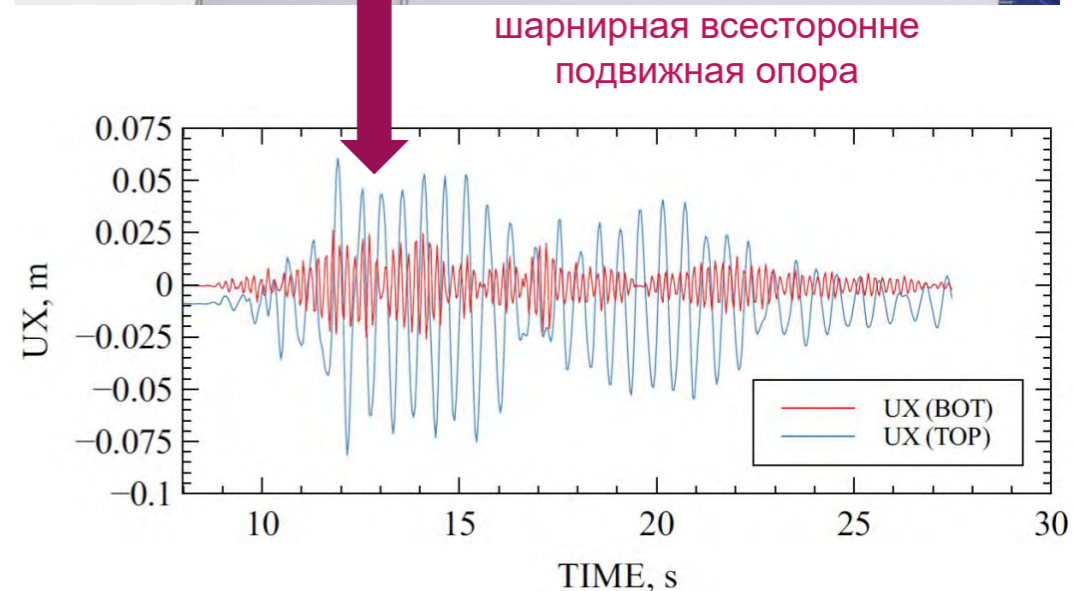
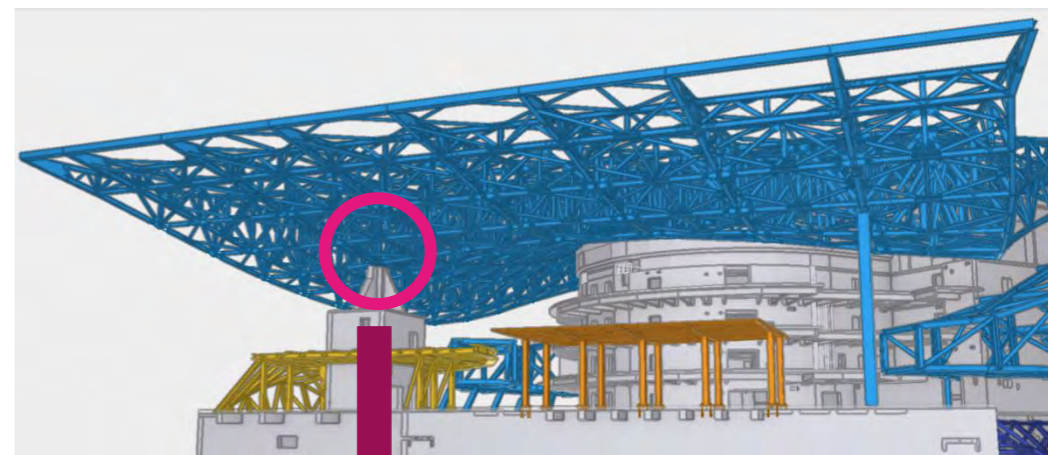
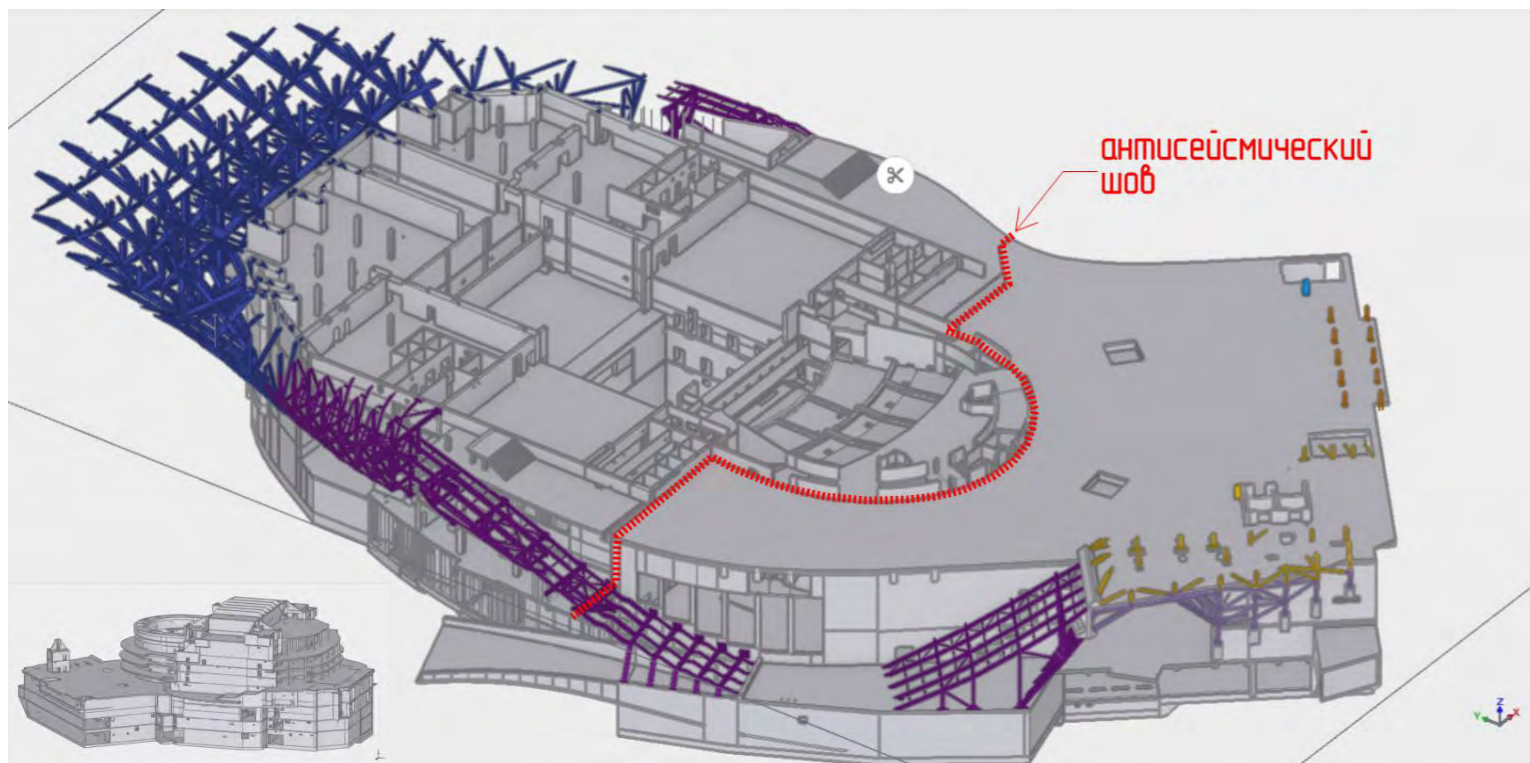


Рис. П2.23. 55-ая форма собственных колебаний, $f_{55}=3,959$ Гц. С учетом конвертации расчетных нагрузок в массы (0.9SW, 0.8DL, 0.5LL).

Антисейсмический шов

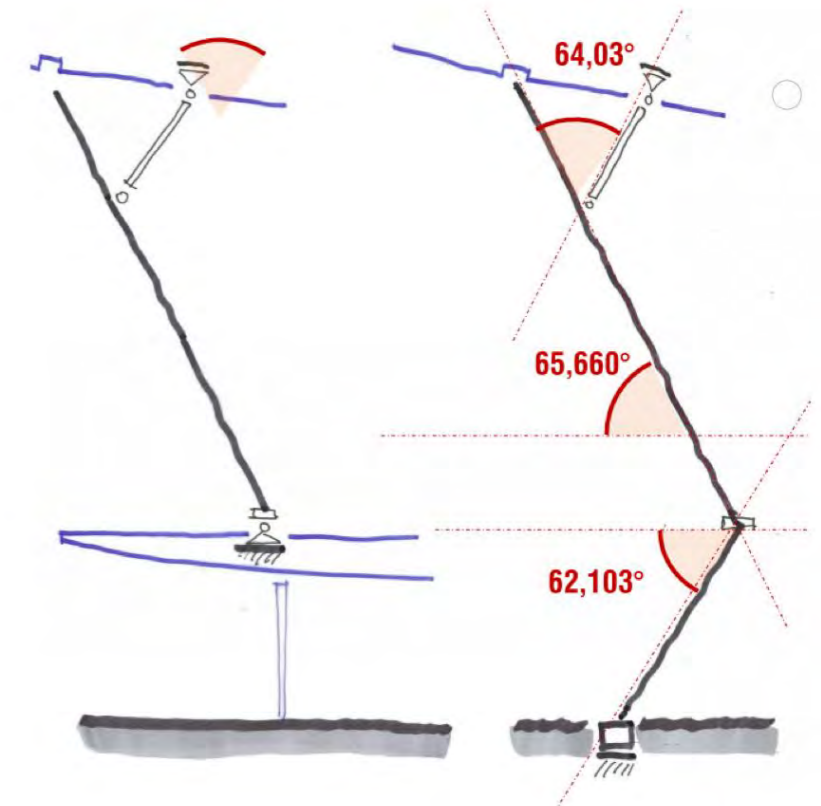
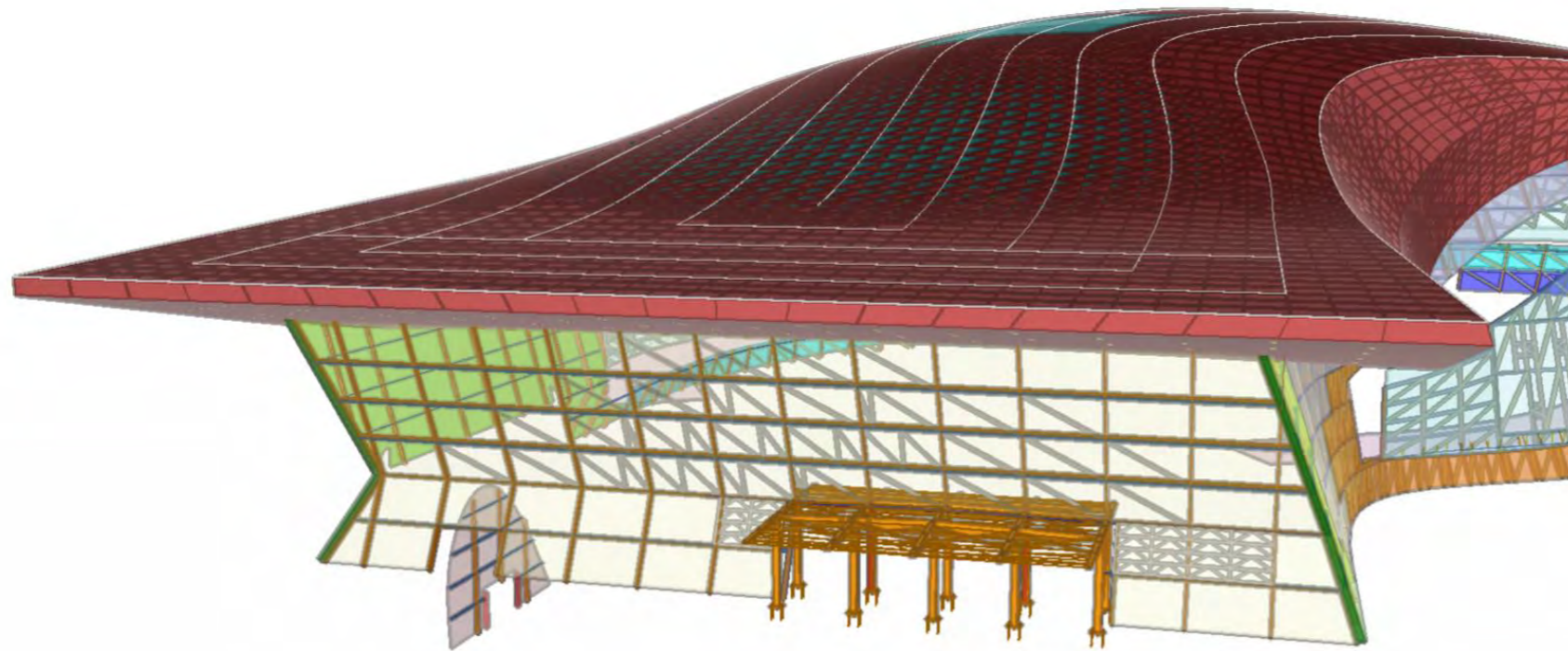


Контрольное землетрясение (MP3). График горизонтальных перемещений опорного узла кровли и железобетонной опоры.

Перемещения имеют различную частоту, а амплитуда перемещения железобетонной опоры более чем в два раза меньше, что свидетельствует о соответствии физическому смыслу независимой динамической опоры в горизонтальном направлении

<p>ЗАО НИЦ СтаДиО - ANSYS Mechanical</p>	<p>ООО «МЕТРОПОЛИС» - ЛИРА-САПР</p>
<p>Абсолютные горизонтальные перемещения U_x опорного узла покрытия в осях D.1/3.1 (узел 12), м. Сейсмика КЗ (MP3) с учётом статического фона, заданная трехкомпонентной акселерограммой Z2_G2, направление воздействия 135°</p>	
<p>$U_{xmax} = 75.6 \text{ мм}, U_{xmin} = -66.8 \text{ мм}$</p>	<p>$U_{xmax} = 74.3 \text{ мм}, U_{xmin} = -70.0 \text{ мм},$</p>

Принципиальные решения фасадов – Bollinger+Grohman

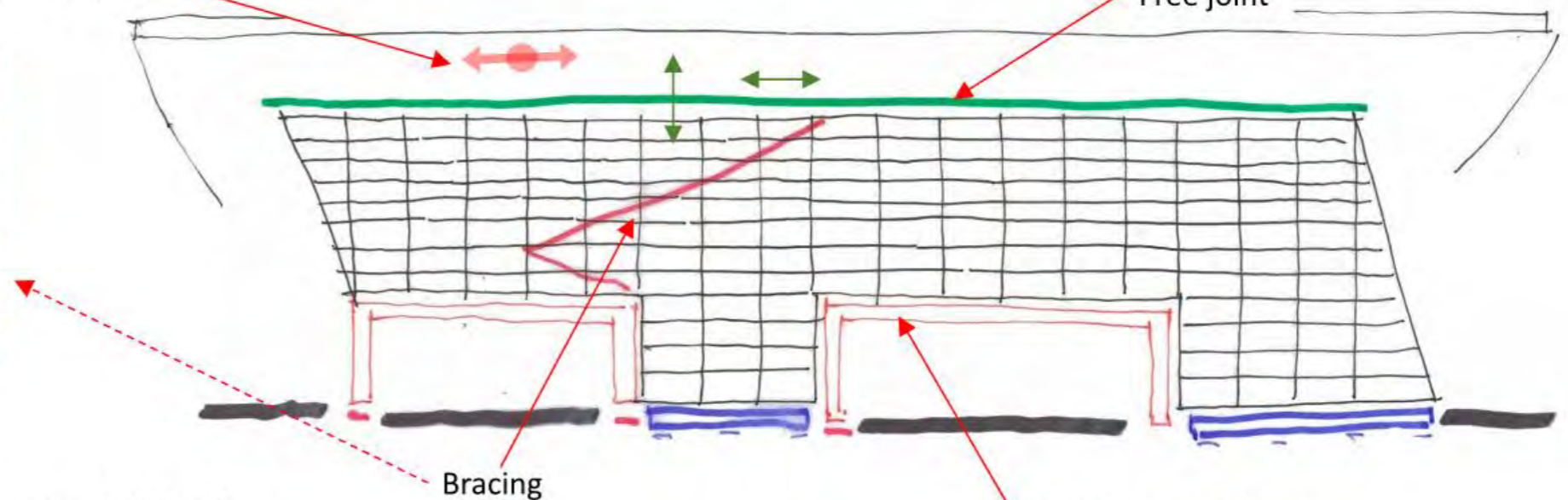


Roof: swinging mass

Free joint



Visualisation of bracing



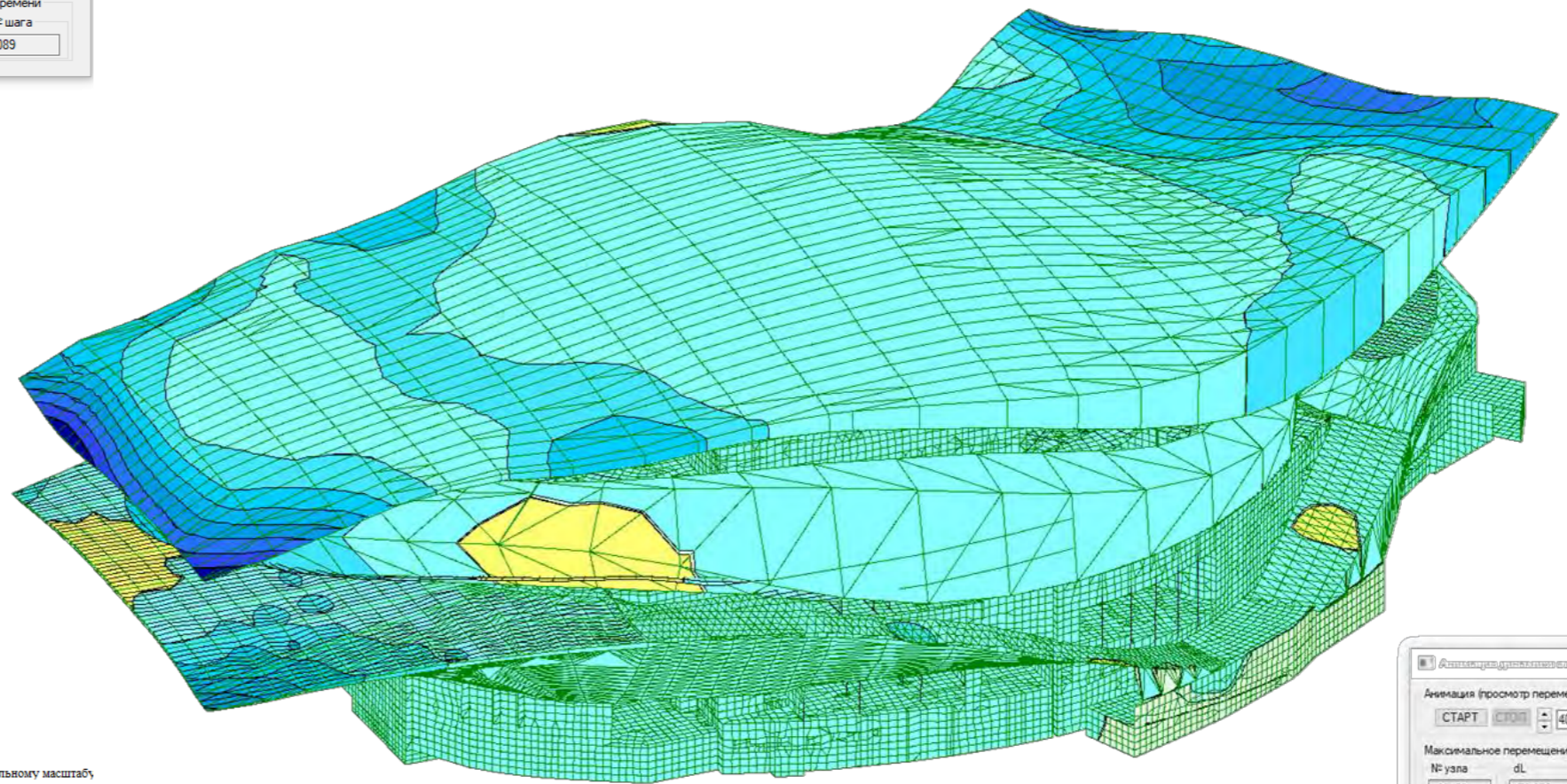
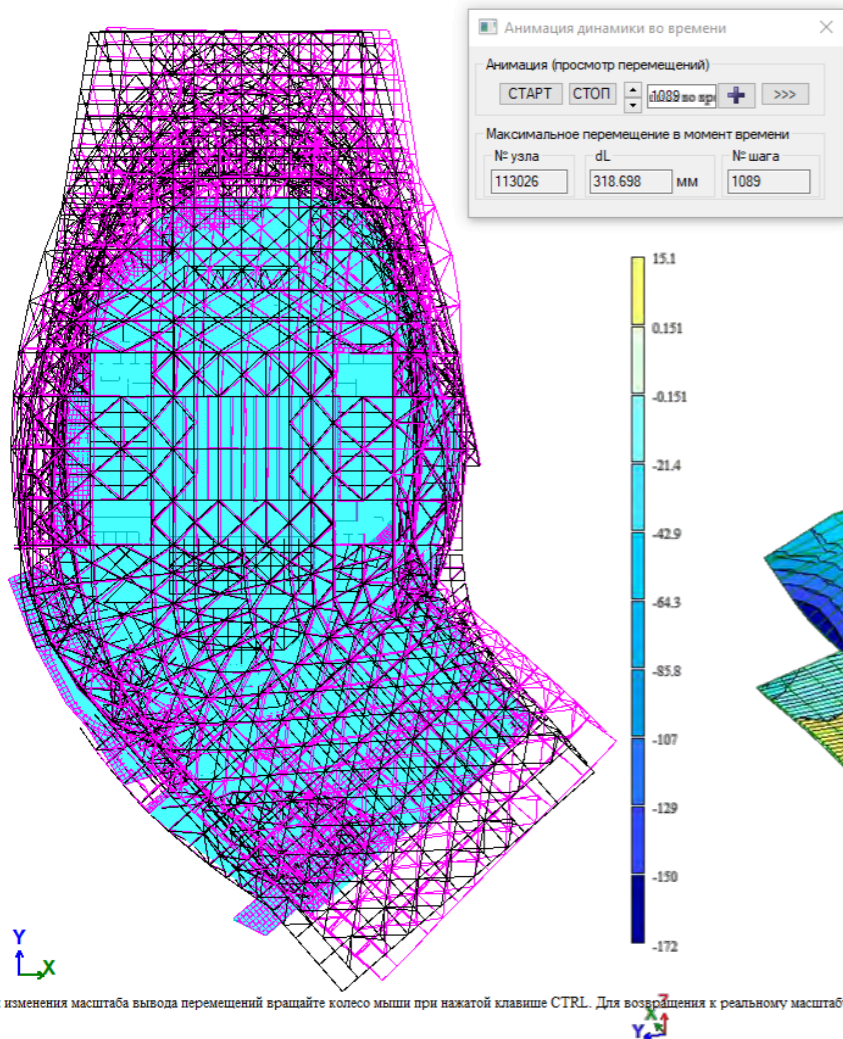
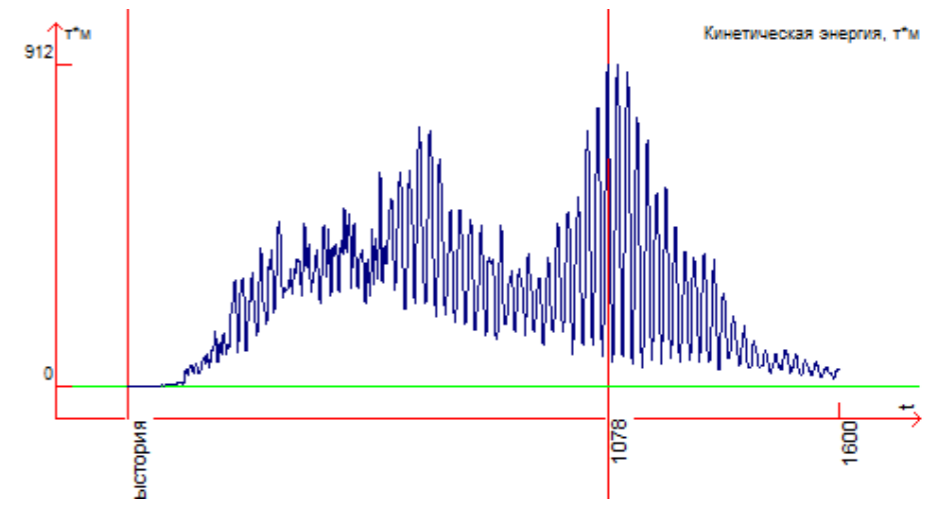
Bracing

Stability portal frame

- Movement & Bracing

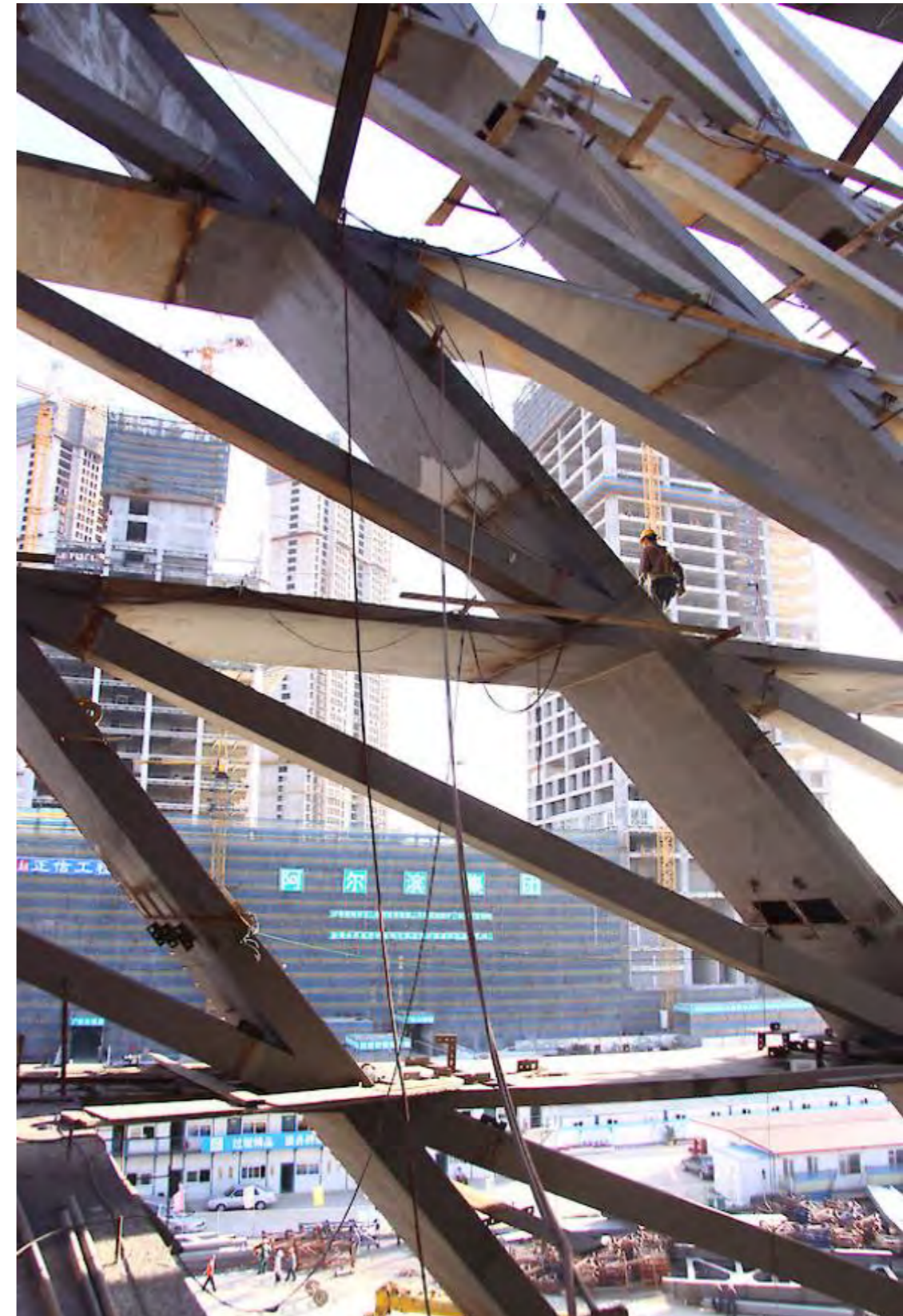
Сейсмические расчеты

Расчет на контрольные землетрясения (МРЗ) в динамической постановке методом прямого интегрирования уравнений движения



Для изменения масштаба вывода перемещений вращайте колесо мыши при нажатой клавише CTRL. Для возвращения к реальному масштабу

Монтажные сварные соединения
Референсный объект - Dalian International Conference Center



Монтажные сварные соединения и точность изготовления

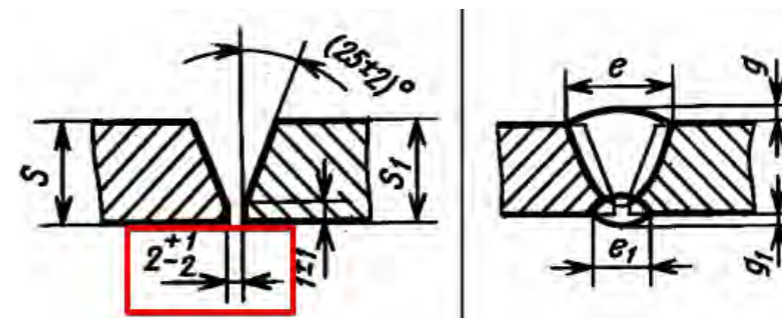
ГОСТ 23118-2019 Конструкции стальные строительные

Таблица Б.3 — Допуски линейных размеров конструкций и отправочных элементов

В миллиметрах

Интервал номинального размера длины	Значения допусков для классов точности					
	1	2	3	4	5	6
От 2500 до 4000 включ.	4	6	10	16	24	40
Св. 4000 до 8000 включ.	5	8	12	20	30	50
Св. 8000 до 16 000 включ.	6	10	16	24	40	60
Св. 16 000 до 25 000 включ.	8	12	20	30	50	80
Св. 25 000 до 40 000 включ.	10	16	24	40	60	100
Св. 40 000 до 60 000 включ.	12	20	30	50	80	120
Значения коэффициента точности K	0,25	0,40	0,60	1,00	1,60	2,50

ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Стыковой двусторонний шов С21 (для открытых сечений)



ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Стыковые соединения на остающейся подкладке (для замкнутых сечений)

Размеры, мм

Таблица 13

Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		$s = s_1$	$b \pm 1$	e		g	
	подготовленных кромок свариваемых деталей	сварного шва			Но-мин.	Пред.откл.	Но-мин.	Пред.откл.
C10			От 3 до 5	3	10	±2	0,5	+1,5 -0,5
			Св. 5 до 8		14			
			Св. 8 до 11		18			
			Св. 11 до 14	22	±3			
			Св. 14 до 17	26				
			Св. 17 до 20	30				
			Св. 20 до 24	34	±4	+2,0 -0,5		
			Св. 24 до 28	38				
			Св. 28 до 32	41				
			Св. 32 до 36	44				
			Св. 36 до 40	49				
			Св. 40 до 44	53				
			Св. 44 до 48	56	±4	+2,0 -0,5		
			Св. 48 до 52	60				
			Св. 52 до 56	64				
			Св. 56 до 60	68				

Размеры, мм

Таблица 23

Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		$s = s_1$	$b \pm 1$	e		g	
	подготовленных кромок свариваемых деталей	сварного шва			Но-мин.	Пред.откл.	Но-мин.	Пред.откл.
C19			От 6 до 10	8	17	±2	0,5	+1,5 -0,5
			Св. 10 до 14		19			
			Св. 14 до 18		22			
			Св. 18 до 22	24	±3			
			Св. 22 до 26	26				
			Св. 26 до 30	28				
			Св. 30 до 35	30	±4	+2,0 -0,5		
			Св. 35 до 40	32				
			Св. 40 до 47	34				
			Св. 47 до 54	36				
			Св. 54 до 60	38				
			Св. 60 до 66	40				
			Св. 66 до 72	44	±5	+3,0 -0,5		
			Св. 72 до 78	48				
			Св. 78 до 85	52				
			Св. 85 до 92	56				
Св. 92 до 100	60							

Изменение типологии основных стальных сечений

для использования болтовых монтажных соединений между стадиями SD (schematic design) и DD (design development) от Bollinger+Grohman

4.2.3. CROSS SECTIONS

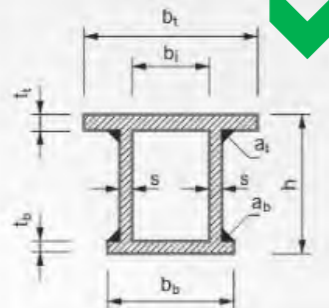
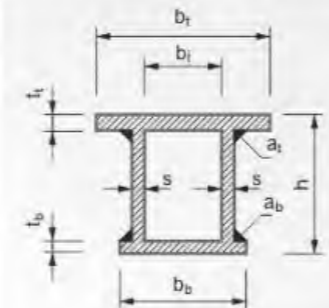
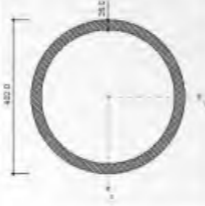
The following cross sections have been used for the individual parts of the main structure:

Reinforced Concrete

The load bearing structure consists of vertical walls with varying thickness from 30cm for secondary shear walls up to 100cm at the main shear walls. Regular columns have square cross sections from 30x30cm up to 100x100cm. Slab thicknesses range from 30cm for typical slabs for a maximum span of 9 meters, up to combined rib-slabs comprising slab thicknesses of 30cm with down stand beams with a height up to 150cm for slabs for a maximum span of 24 meters.

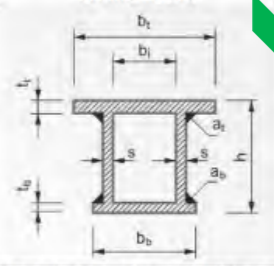
Консоль

Cantilevering Terrace Steel Structure

Main chord members, secondary chord members & diagonal members 	Main chord members, secondary chord members & diagonal members 	Diagonal bracing members 
BOX 350/12/12/126/350/350/12 BOX 1200/100/100/800/1200/1200/100	BOX 350/12/12/126/350/350/12 BOX 1200/100/100/800/1200/1200/100	RO 457.0x20.0 (Hot Formed)

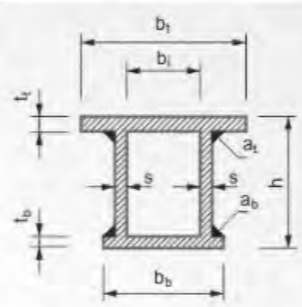
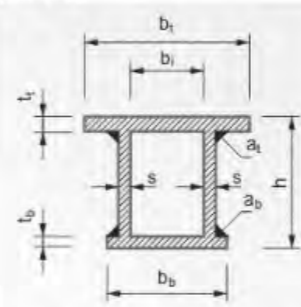
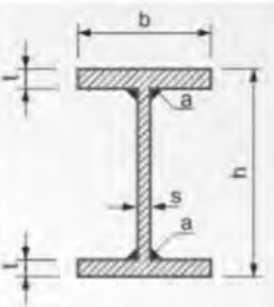
"N"-shaped Mega Steel Beams

Колонны

All members 
BOX 1200/100/100/800/1200/1200/100/40/40 BOX 1200/160/160/700/1200/1200/160/40/40 or compound member with thinner wall thickness and reinforced concrete core

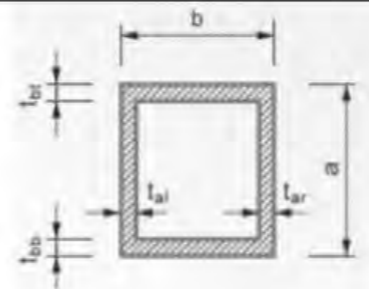
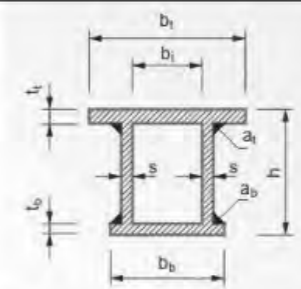
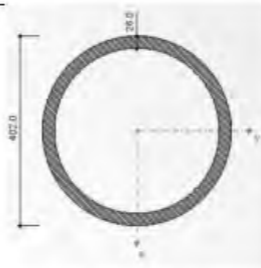
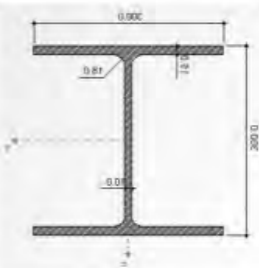
Clip Steel Structure

Пояс

Integrated "N" shaped mega beams 	Edge chord members & diagonal members 	Beams supporting the slabs 
BOX 1200/40/40/920/1200/1200/40	BOX 250/80/80/50/250/250/80 BOX 800/60/60/520/800/800/60	IS 400/300/24/12

Roof Steel Structure

Кровля

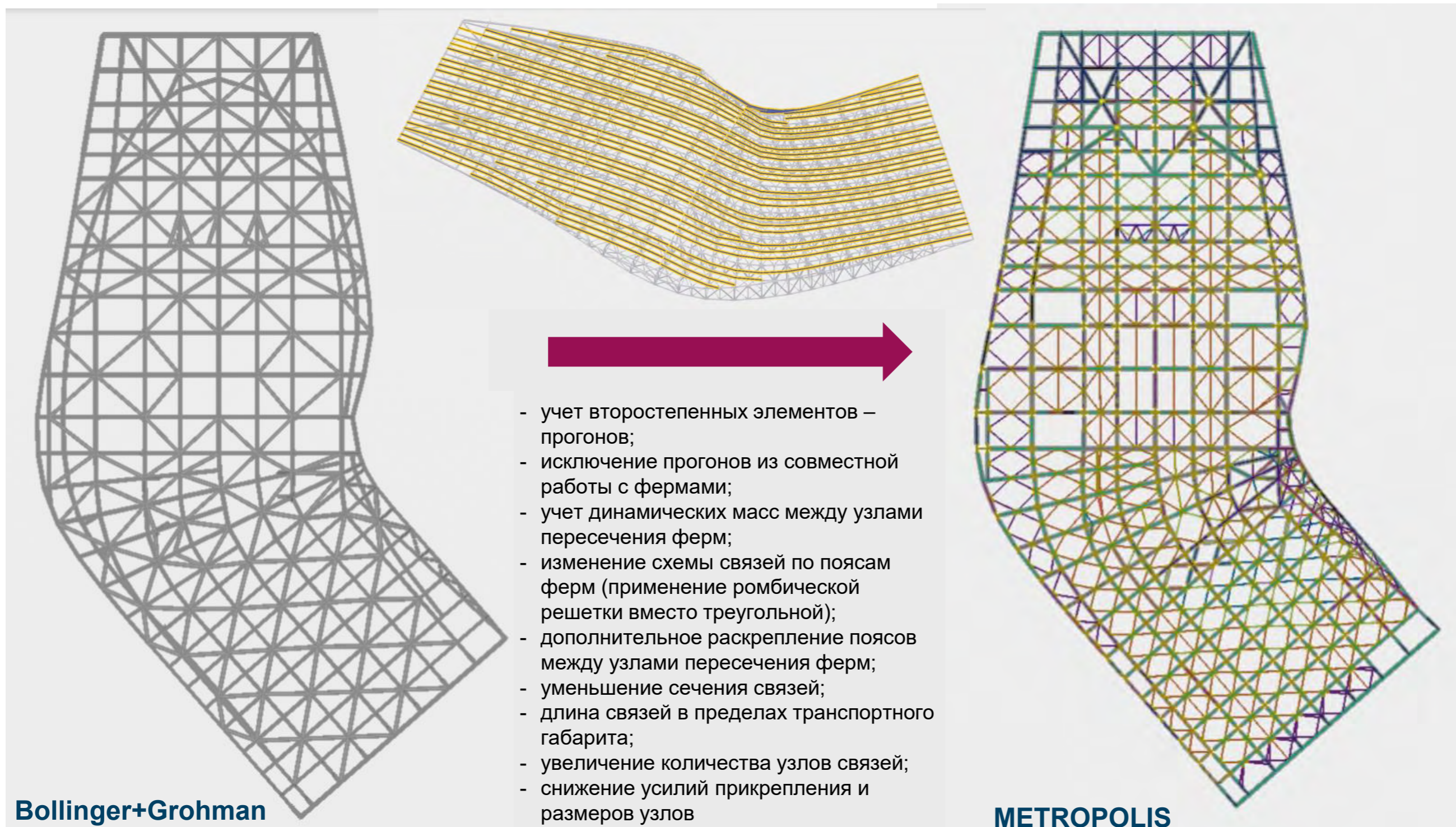
Distributing beams above supports 	Chord members, beams above supports, diagonal members 
TO 1100/1100/100/100/100/100	BOX 300/10/10/130/300/300/10 BOX 900/80/80/550/900/900/80
Bracing members 	Secondary beams 
RO 377x16 RO 500x25	HG 30K2



Замкнутые коробчатые сечения сохранены в стадии DD. Для всех других элементов приняты открытые двутавровые сечения.

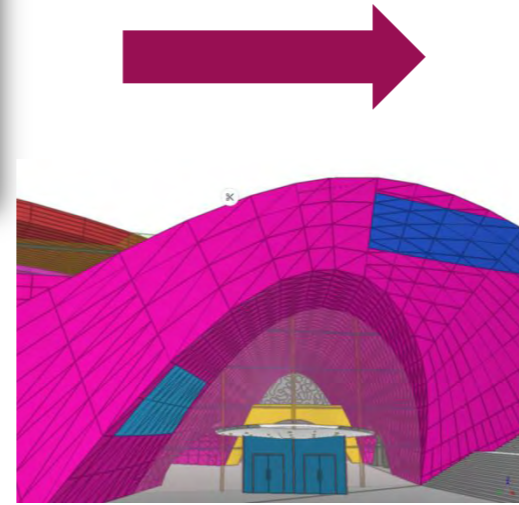
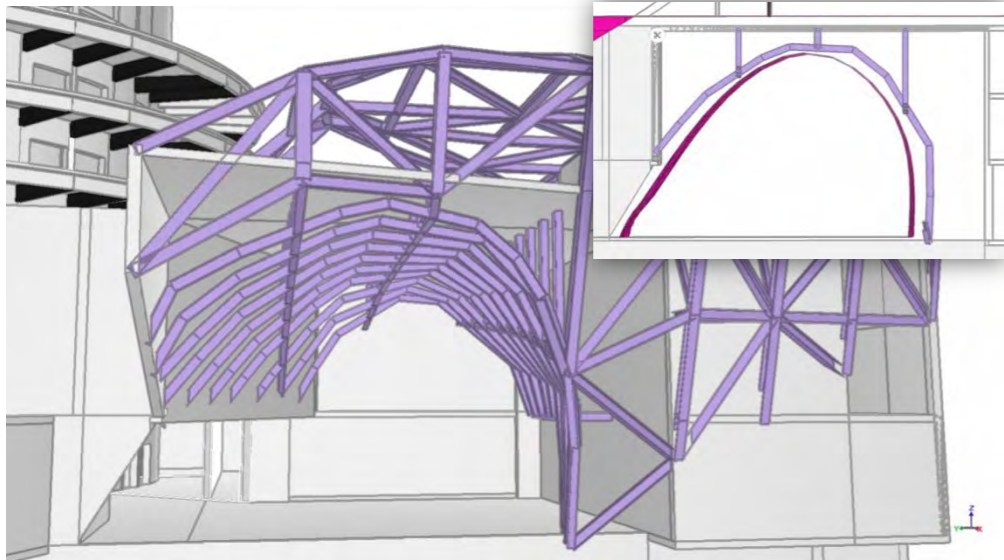
Развитие конструктивных схем и решений.

Уточнение расчетных динамических моделей (РДМ) на примере конструкций кровли

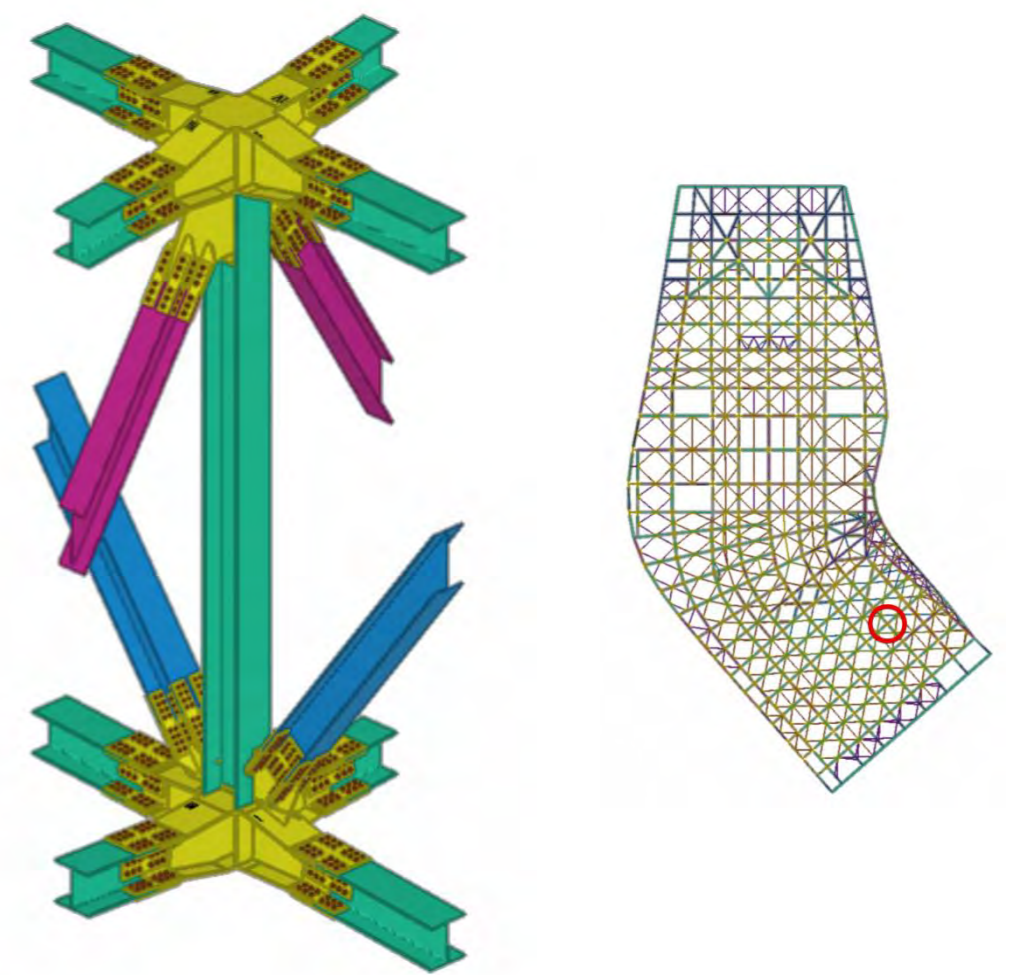
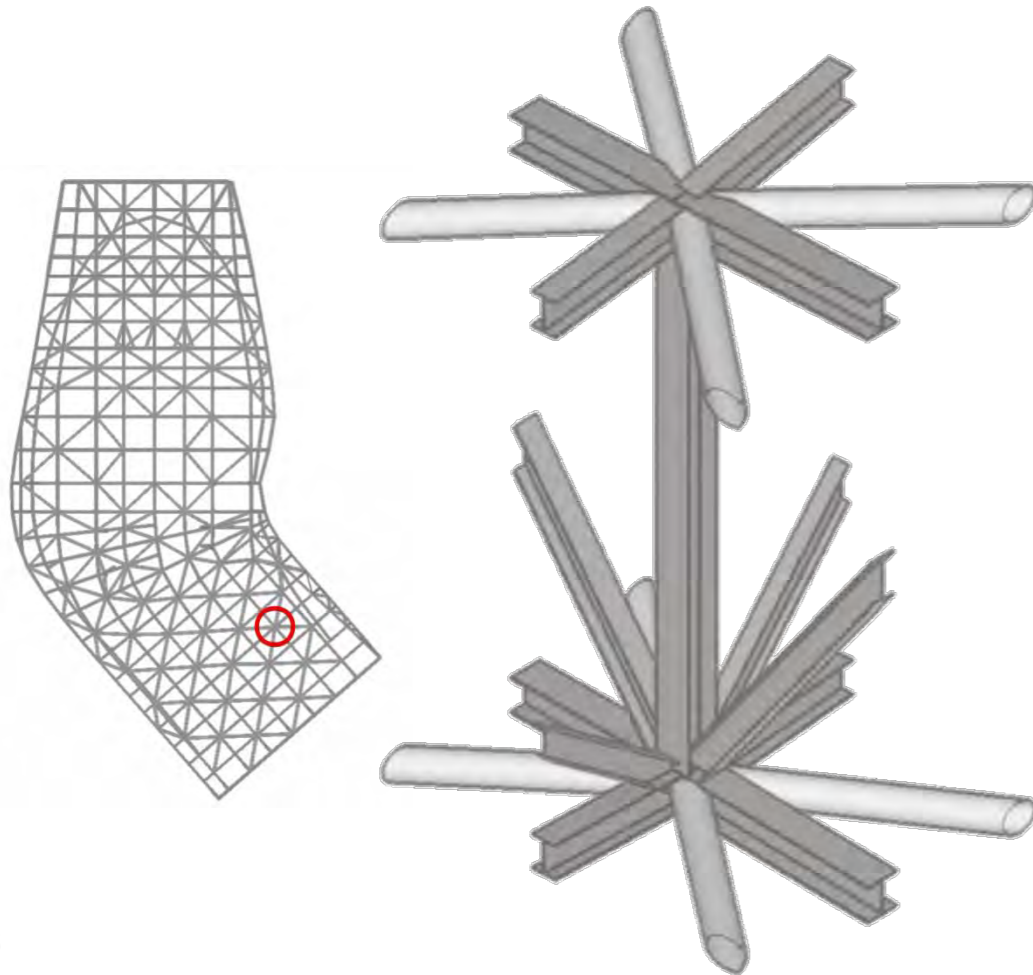
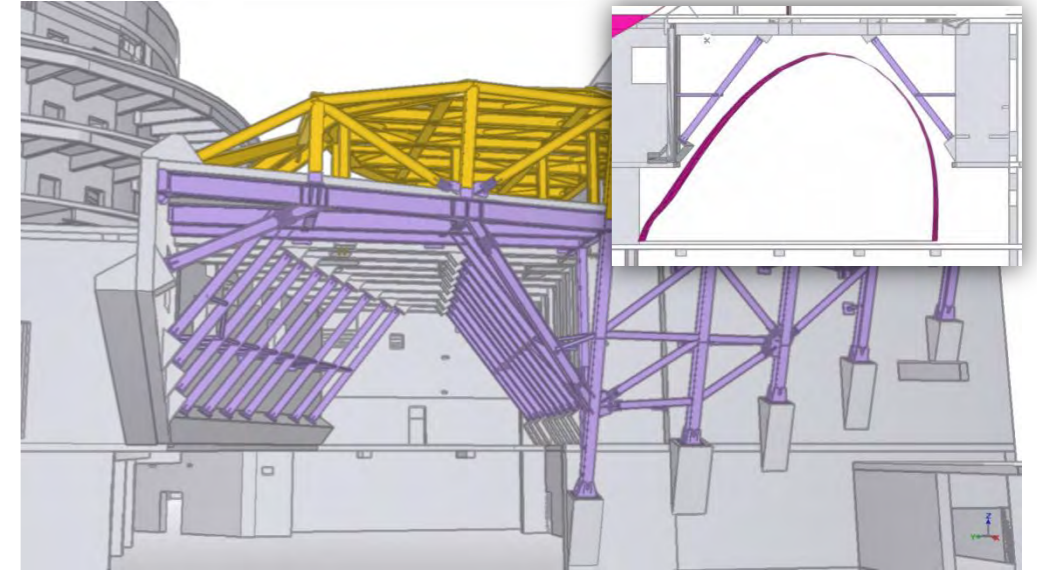


Развитие конструктивных схем и решений

Bollinger+Grohman



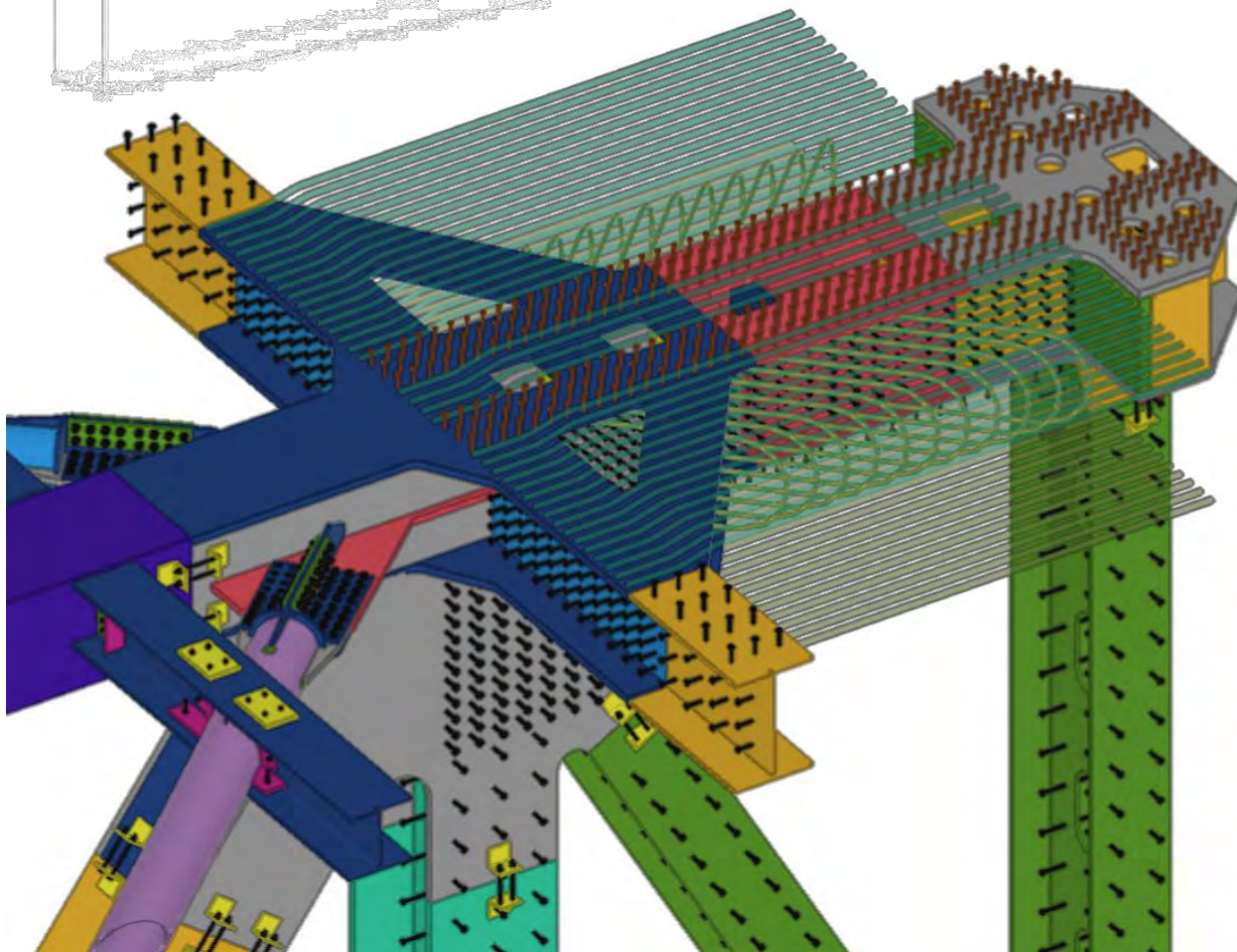
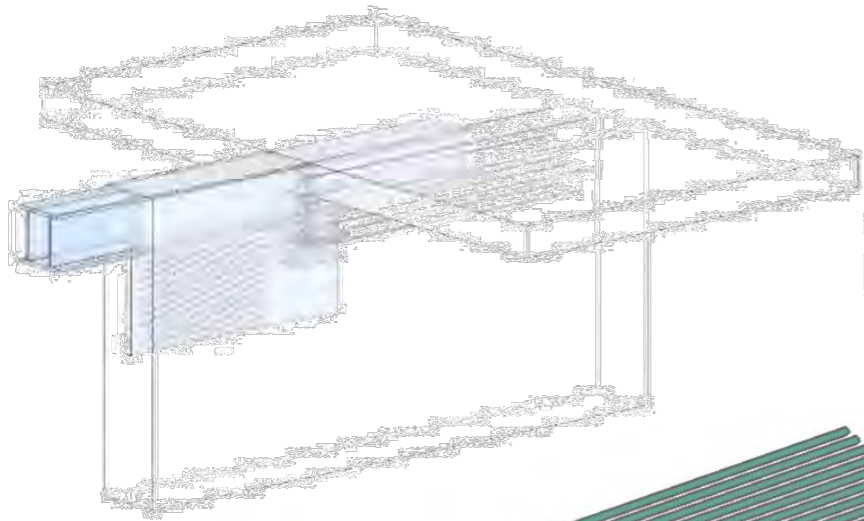
METROPOLIS



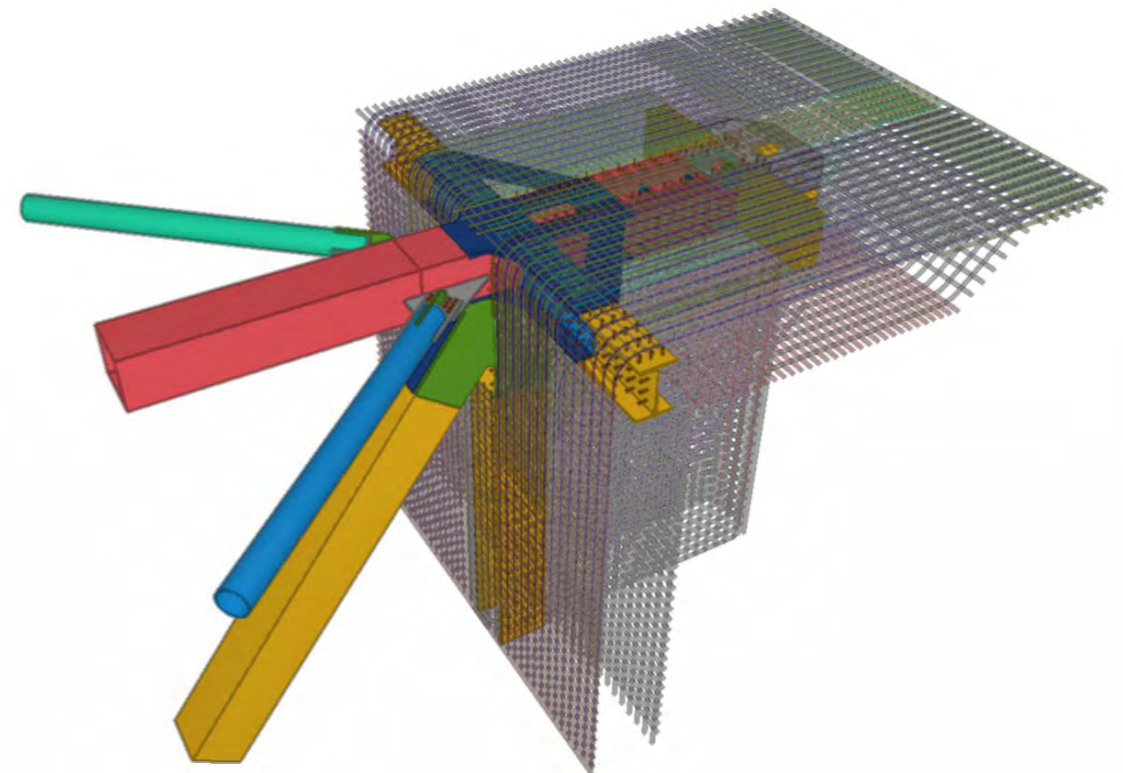
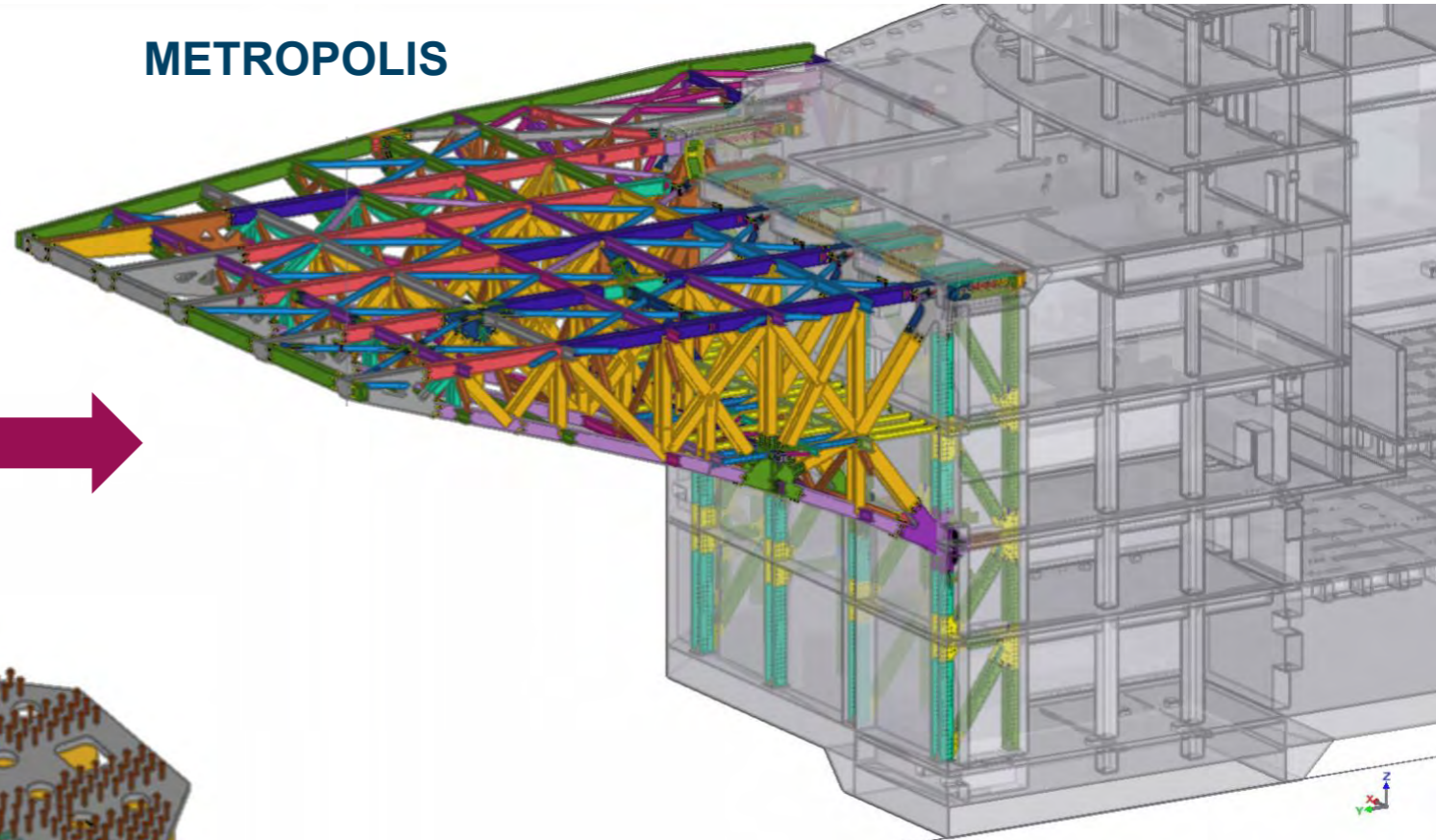
Развитие конструктивных схем и решений. Крепление консоли

Bollinger+Grohman

Upper chords of the cantilevering terrace trusses



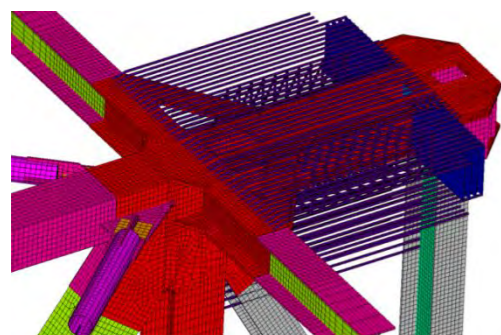
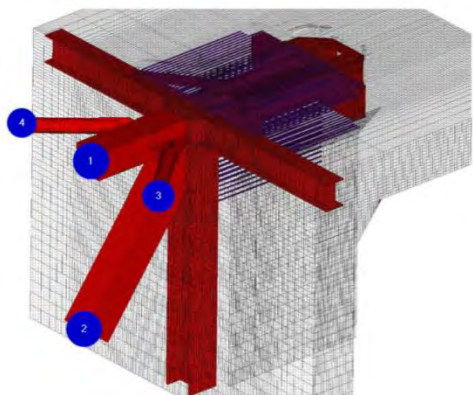
METROPOLIS



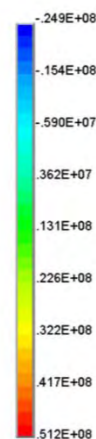
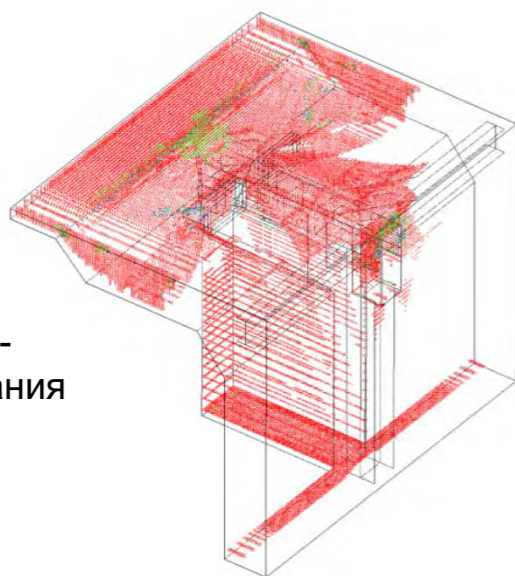
Развитие конструктивных схем и решений

Расчеты узлов – НИЦ Стадио

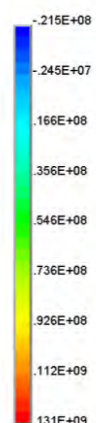
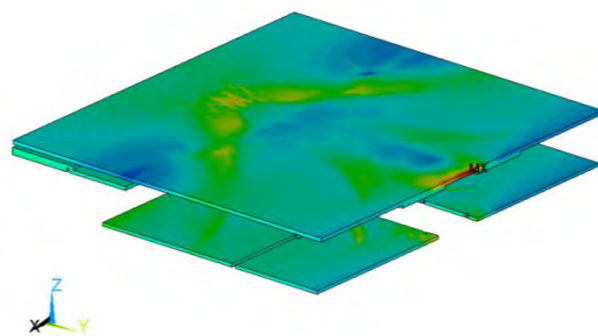
Расчетная схема (ANSYS)



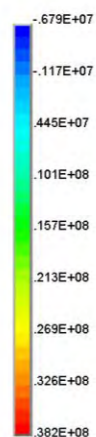
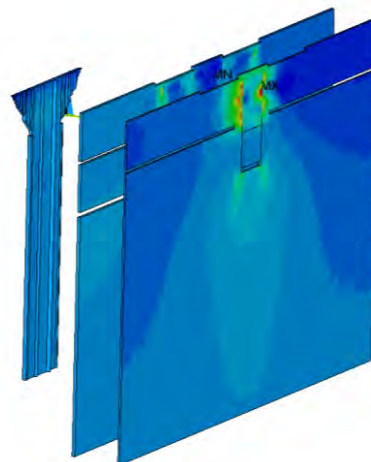
Картина
Трещино-
образования



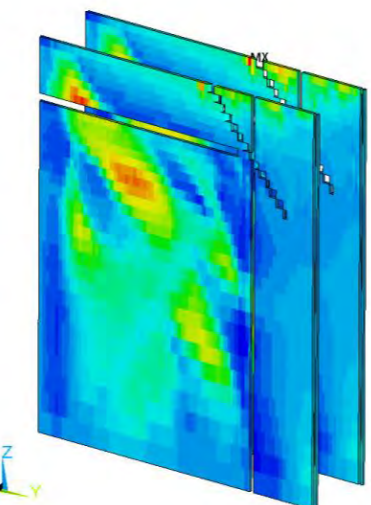
Напряжения в арматуре по оси X, Па



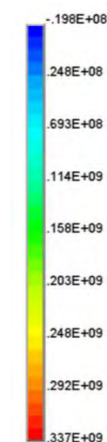
Напряжения
в арматуре
по оси X, Па



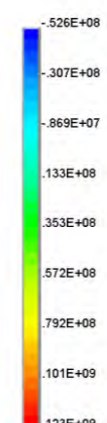
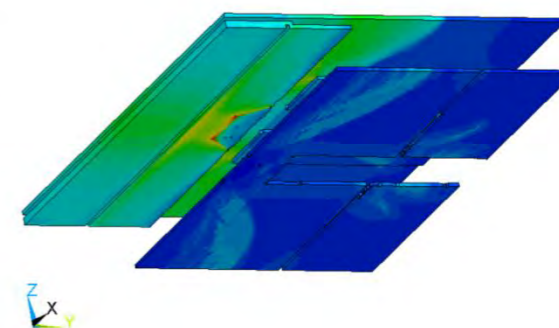
Напряжения
в арматуре
по оси Y, Па



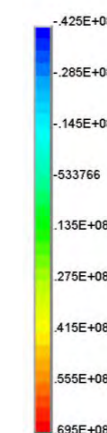
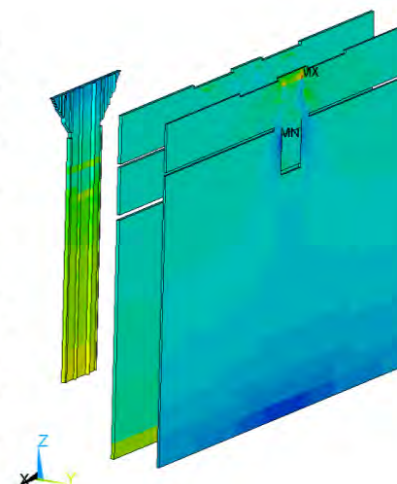
Верхний узел крепления консоли



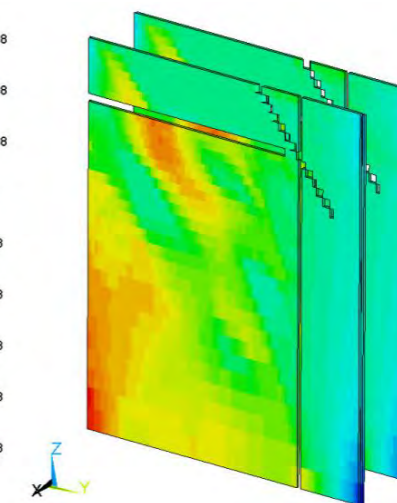
Напряжения в арматуре по оси Y, Па



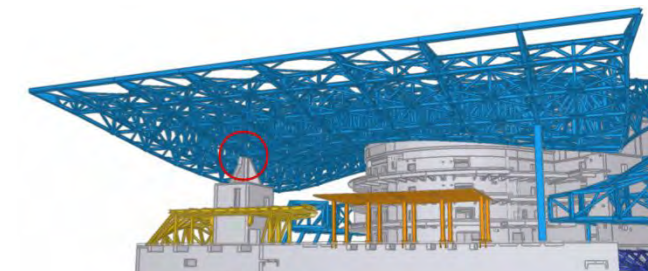
Напряжения
в арматуре
по оси Z, Па



Напряжения
в арматуре
по оси Z, Па



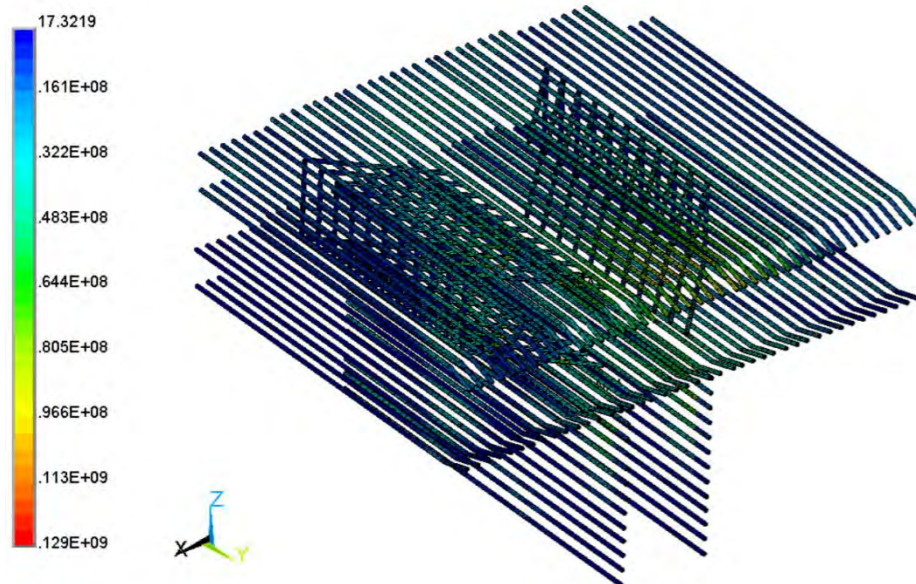
Развитие конструктивных схем и решений Расчеты узлов – НИЦ Стадио



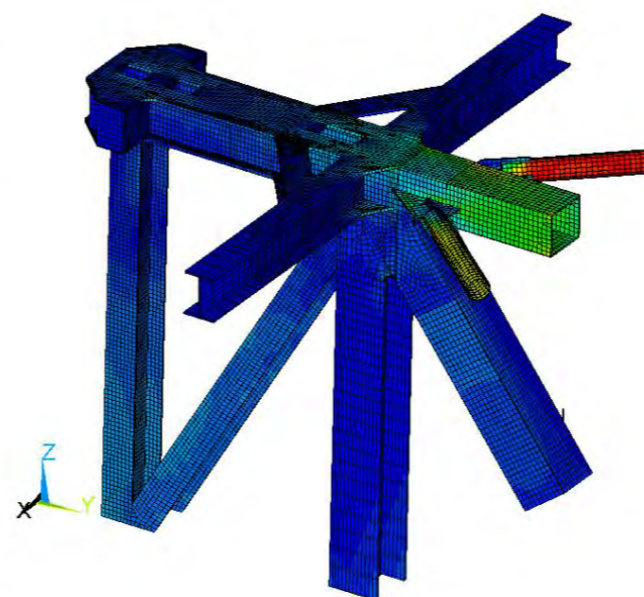
Верхний узел крепления консоли

Опорный узел кровли

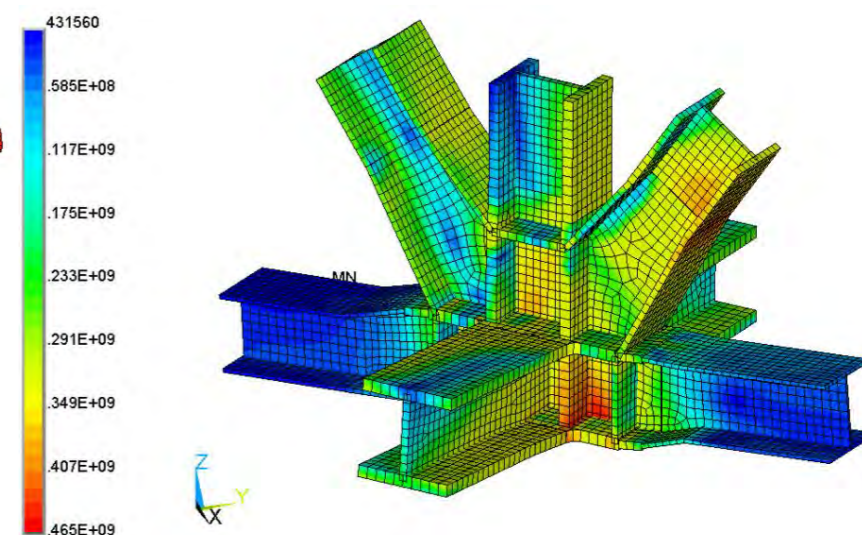
Напряжения в анкерной арматуре, Па



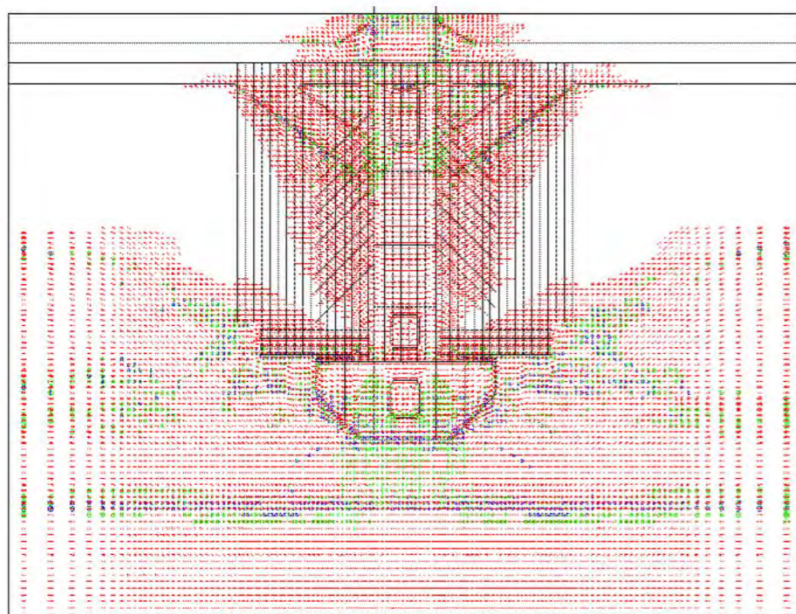
Эквивалентные напряжения. Па



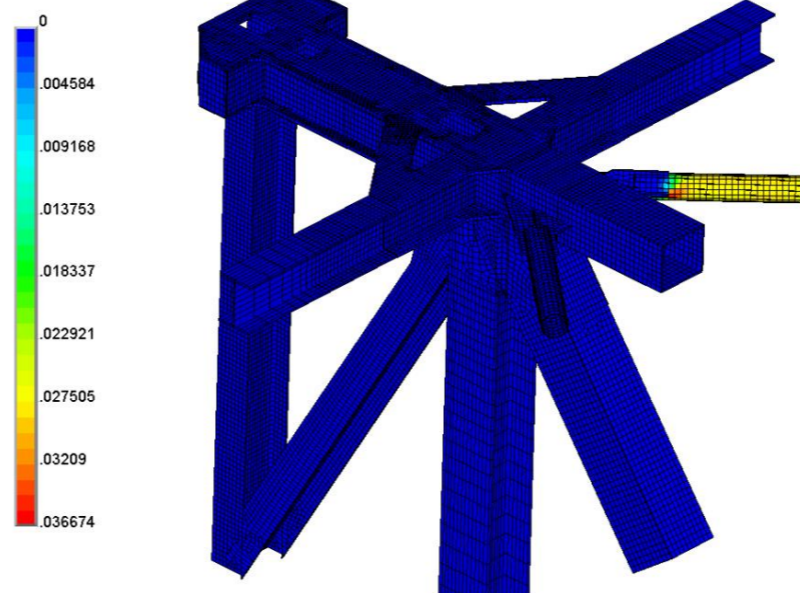
Эквивалентные напряжения, Па



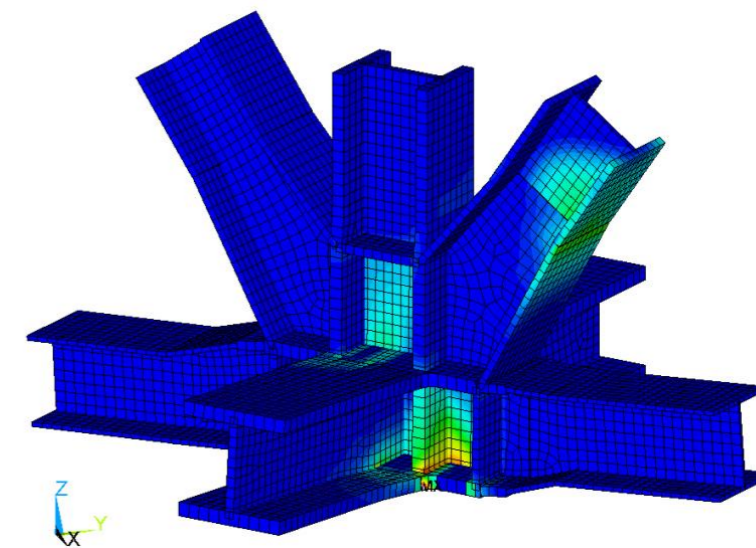
Картина трещинообразования. Вид сверху



Пластические деформации



Пластические деформации



METROPOLIS

www.metropolis-group.ru

Сергей Руднев

s.v.rudnev@metropolis-group.ru

+7 (980) 32 60 435

The logo for the Association for the Development of Steel Construction (APCC) features the letters 'APCC' in a bold, stylized font. Each letter is filled with a white, intricate geometric pattern of interconnected lines, resembling a steel lattice or truss structure. The letters are set against a dark background.

Ассоциация развития
стального строительства

АССОЦИАЦИЯ РАЗВИТИЯ
СТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

+7 (495) 744-02-63

info@steel-development.ru

www.steel-development.ru