

ОПИСАНИЕ

работы

«Комплекс научно-исследовательских работ по расчетному обоснованию механической безопасности (напряженно-деформированного состояния, динамики, прочности и устойчивости) систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года (в Самаре, Нижнем Новгороде, Волгограде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге) при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий»,

представленной на конкурс на медали и дипломы РААСН в номинации:

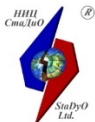
За лучшее научное сопровождение реализованного инженерного проекта (за лучшую научно-исследовательскую и/или проектно-конструкторскую разработку, в результате которой получен значительный экономический или социальный эффект, подтвержденный конкретными расчетами и рекомендациями)

Работа выдвигается на конкурс организацией:

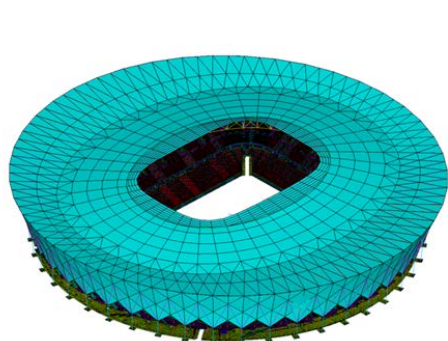
ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (НИЦ СтаДиО)

Авторский коллектив:

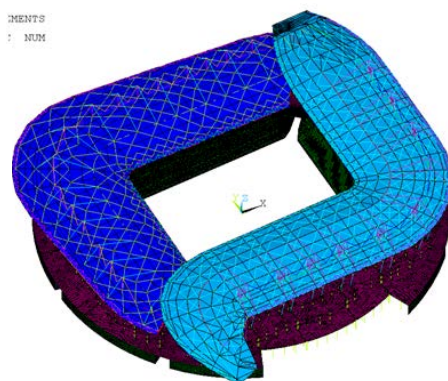
№ п/п	Фамилии, имена, отчества членов авторского коллектива, ученые степени, ученые звания, должности по основному месту работы
1	Белостоцкий Александр Михайлович, член-корреспондент. РААСН, профессор, доктор технических наук, генеральный директор НИЦ СтаДиО. <i>Руководитель работы</i>
2	Аул Андрей Андреевич, ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО
3	Дмитриев Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО
4	Нагибович Александр Игоревич, ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО
5	Островский Константин Игоревич, кандидат технических наук, ведущий инженер-программист отдела разработки и сопровождения программ НИЦ СтаДиО
6	Павлов Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО



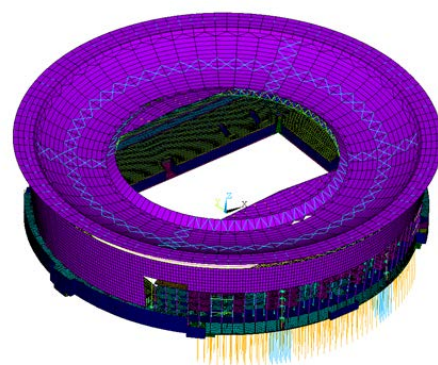
Комплекс научно-исследовательских работ по расчетному обоснованию механической безопасности (напряженно-деформированного состояния, динамики, прочности и устойчивости) систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года (в Самаре, Нижнем Новгороде, Волгограде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге) при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий.



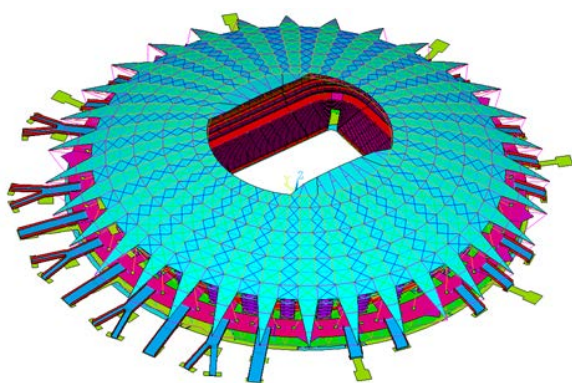
г. Волгоград



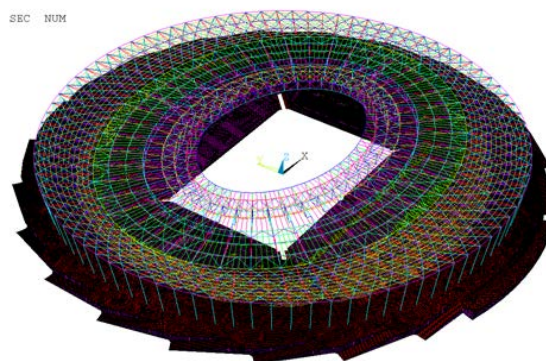
г. Ростов-на-Дону



г. Екатеринбург



г. Самара



г. Нижний Новгород

Авторский коллектив работы

Руководитель работы:

Генеральный директор НИЦ СтаДиО,
член-корр. РААСН, проф., д.т.н.

А.М. Белостоцкий

Члены авторского коллектива:

Ведущий инженер-расчетчик
отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО

А.А. Аул

Ведущий инженер-расчетчик
отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО

Д.С. Дмитриев

Ведущий инженер-расчетчик
отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО

А.И. Нагибович

Ведущий инженер-программист
отдела разработки и сопровождения
программ НИЦ СтаДиО, к.т.н.

К.И. Островский

Ведущий инженер-расчетчик
отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО, к.т.н.

А.С. Павлов

Содержание

1. Авторский коллектив работы	4
2. История (до 2013 года) – объекты и задачи.....	7
3. Стадионы к чемпионату мира по футболу 2018 года (объекты, вошедшие в заявку) 9	9
4. Основные проблемы и достижения в расчетном обосновании стадионов	27
4.1. Детальность - вычислительная размерность КЭ-моделей.....	28
4.2. Сравнительный анализ НДС, собственных частот и форм колебаний полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем «металлические конструкции покрытия» и «основание – железобетонные конструкции трибун».....	29
4.3. Моделированием неоднородного грунтового основания и свайного поля.	33
4.4 Многоитерационный процесс дополнения и корректировки положения и характеристик несущих конструкций стадиона на основании результатов статических и динамических расчетов, в том числе, для удовлетворения критериям зыбкости конструкции «гребенки» трибун.	36
4.5 Расчетные исследования трехмерного НДС и прочности конструктивных узлов металлического покрытия с учетом эффектов физической нелинейности.	38
4.6 Расчет на устойчивость металлических конструкций покрытий с учетом физической и геометрической нелинейностей и начальных несовершенств.	41
4.7 Геометрически нелинейное моделирование предварительно напряженных) вантовых элементов в составе конструкций покрытия, в том числе, при расчете на прогрессирующее обрушение.	44
4.8. Динамические расчеты системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» на сейсмические воздействия.	50
4.9. Сопоставление результатов альтернативных расчетов, выполненных согласно требованиям специальных технических условий, в верифицированных/ сертифицированных программных комплексах.....	59
4.10. Оптимизационный процесс дополнения и корректировки конструкций сборно-разборных (временных) трибун для удовлетворения критериев прочности и устойчивости несущих элементов конструкции и динамической комфортности (зыбкости) трибун.....	57
4.11. Научно-техническое сопровождение прохождения в ФАУ «Главгосэкспертиза России» в части расчетного обоснования проектов упомянутых стадионов.....	63
5. Заключение.....	64
6. Благодарности	65
7. Список литературы	66

1. Авторский коллектив



Белостоцкий Александр Михайлович

Основатель (1991 г.) и генеральный директор НИЦ СтаДиО, член-корреспондент РААСН, профессор, доктор технических наук, научный руководитель Научно-образовательных центров (НОЦ) компьютерного моделирования НИУ МГСУ, РУДН, РУТ (МИИТ), Томского ГАСУ, ДВФУ. университета «Дубна» и др.,

Основные направления научных исследований: математическое моделирование, разработка, исследование и использование численных методов и программно-алгоритмических комплексов расчета нагрузок и воздействий, состояний, прочности и устойчивости уникальных конструкций, зданий и сооружений для стадий проектирования, строительства, эксплуатации (мониторинга) и экспертизы.

Разработал, верифицировал и внедрил в практику исследований оригинальные модели, численные методы и реализующие программные комплексы температурного, статического и динамического расчета пространственных строительных, машиностроительных и др. систем большой размерности с учетом эффектов физической, геометрической, структурной и генетической нелинейности. Разработчик фирменных программных комплексов СТАДИО (1975 год) и АСТРА-НОВА (1976-77 год)

Под его руководством выполнены и прошли Главгосэкспертизу России расчетные обоснования многих уникальных объектов гражданского (небоскребы, стадионы и дворцы спорта) и промышленного (гидро-, атомные, тепловые и ветровые электростанции) строительства. **В том числе – стадионы к Чемпионату мира по футболу 2018 года (Санкт-Петербург, Самара, Волгоград, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Екатеринбург).**

Опубликовано более 300 научных работ, включая нормативные методики расчета. Подготовил 5 кандидатов технических наук.



Аул Андрей Андреевич

Ведущий инженер расчетчик отдела расчетных исследований, ведущий программист отдела разработок и сопровождения программ НИЦ СтаДиО. Окончил Московский государственный строительный университет (МГСУ) в 2007 году с отличием по специализации «Теория сооружений» (кафедра «Строительной механики») специальности «Промышленное и гражданское строительство».

В НИЦ СтаДиО с 2005 года. За время работы прошел большой путь, трансформировавшись из классного расчетчика, знатока ANSYS Mechanical и одного из основных его верификаторов в системе РААСН, в ведущего разработчика знаменитого фирменного программного комплекса АСТРА-НОВА. Послужной список исследованных зданий и сооружений: участие в экспертизе обрушения здания Басманного рынка, моделирование небоскреба «Дирижабль» в проектом варианте и с учетом фактических характеристик, **расчетное обоснование системы «свайное основание – стилобат – трибуны – стационарная крыша – раздвижная крыша» стадиона «Зенит» и других стадионов (к Чемпионату мира по футболу 2018 года)**, ряд других уникальных объектов. В расчетах трубопроводных систем: основной исполнитель по сверхсложным суперразветвленным системам барабанов-сепараторов Билибинской АЭС, реакторов по производству трудновыговариваемых нефтехимических смесей и пр. Автор целого ряда новых разработок в АСТРА-НОВА: АСТРА-ДЕТАЛЬ (расчет по выбору основных размеров деталей), АСТРА-СВД (трубопроводы высокого и сверхвысокого давления), уточненный расчет напряжений в элементах и др.

В 2008-2012 году был соискателем в НИУ МЭИ на кафедре «Динамика и прочность машин».



Дмитриев Дмитрий Сергеевич

Ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО

Окончил с отличием Московский государственный университет природообустройства по специальности «Гидротехническое строительство» в 2011 году. Аспирант того же университета с 2012 года (научный руководитель – профессор Г.М. Каганов, с 2013 года – А.М. Белостоцкий).

В НИЦ СтаДиО – с 2011 года. Занимается выполнением сложных и наукоемких расчетных исследований ответственных и уникальных систем, конструкций, зданий, сооружений и комплексов.

Принимал участие в расчетном обосновании запроектированных и возведенных стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года (Санкт-Петербург, Самара, Волгоград, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Екатеринбург) в верифицированном программном комплексе ANSYS Mechanical.

Основное направление научной деятельности – численное моделирование взаимодействия сооружений с массивом основания и жидкости при динамическом (сейсмическом) воздействии.

Опубликовал 9 научных статей по диссертационной тематике. Активный участник ряда научных конференций.



Нагибович Александр Игоревич

Ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований НИЦ СтаДиО

Аспирант и сотрудник кафедры прикладной математики Московского государственного строительного университета

Инженер научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий и сооружений Московского государственного строительного университета

Окончил в 2008г. с отличием Московский государственный строительный университет по специальности «Прикладная математика». Дипломная работа была выполнена в НИЦ СтаДиО и развивала тему суперэлементов и динамического синтеза подконструкций на примере системы «стилобат – высотное здание 1 – высотное здание 2» (в ПК СТАДИО).

Аспирант НИУ МГСУ с 2014 года (научный руководитель – А.М. Белостоцкий). Диссертация посвящена особенностям численного моделирования больших современных футбольных стадионов, и, в частности, применению суперэлементного подхода и динамического синтеза подконструкций.

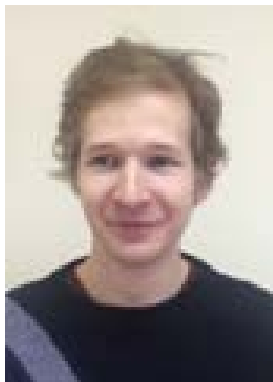
В НИЦ СтаДиО занимается выполнением расчетных исследований сложных, ответственных и уникальных систем, конструкций, зданий, сооружений и комплексов.

Начинал с расчетов многоэтажных зданий и торговых комплексов в SCAD. Затем пришла «стадионная» эпоха к Чемпионату мира по футболу 2018 года (Санкт-Петербург, Самара, Волгоград, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Екатеринбург). Отвечает, в том числе, за моделирование всей железобетонной части и за сравнительный анализ результатов расчетов, выполненных по альтернативным моделям в программных комплексах ANSYS Mechanical и SCAD Office.

С 2016 года подключился к разработке геометрических и КЭ-моделей основных сооружений Загорских ГАЭС.

С 2017 года преподаватель кафедры Прикладной математики НИУ МГСУ.

Опубликовал 12 научных статей по диссертационной стадионной тематике. Участник ряда научных конференций.



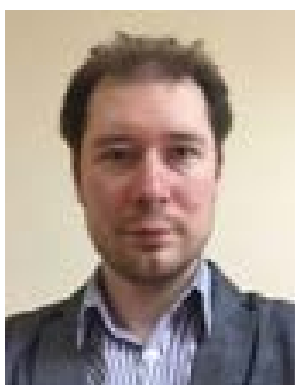
Островский Константин Игоревич.

Ведущий инженер-программист отдела разработки и сопровождения программ НИЦ СтаДиО,
кандидат технических наук

Окончил Московский Энергетический Институт по специальности «Динамика и прочность машин» в 2011 году. После окончания поступил в аспирантуру МЭИ на кафедре ДПМ им. В.В. Болотина. В 2015 году защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Разработка методов решения обратных задач строительной механики для элементов конструкций, взаимодействующих с упругим основанием» по специальности «Строительная механика» в диссертационном совете при Московском государственном строительном университете (МГСУ).

С 2008 года работает в ЗАО НИЦ СтаДиО в должности инженер-программист. Занимается расчетными исследованиями уникальных зданий и сооружений, трубопроводных систем в программных комплексах ANSYS, АСТРА-НОВА. Активно вовлечен в процесс разработки и тестирования программного комплекса АСТРА-НОВА (коммерческий программный комплекс, разрабатываемый НИЦ СтаДиО). Среди проектов, в которых принимал участие, можно выделить: верификацию программного модуля АСТРА-АЭС'2009 в НТЦ ЯРБ, **прочностные расчеты конструкций стадионов (Санкт-Петербург, Волгоград, Екатеринбург), запроектированных и возведенных к чемпионату мира по футболу 2018 года**, объектов Зимней олимпиады 2014 года в Сочи.

Имеет широкий круг научных интересов, активный участник регулярных научно-технических конференций, таких как ВЕМ&FEM и Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений».



Павлов Андрей Сергеевич

Ведущий инженер-расчетчик отдела расчетных исследований
НИЦ СтаДиО
кандидат технических наук

В 2007 году окончил МГСУ с отличием по специальности «Теория сооружений» (кафедра «Строительной механики»). В 2011 году защитил в диссоте МГСУ кандидатскую диссертацию на тему: «Численное моделирование нелинейных процессов разрушения конструкций большепролетных сооружений» по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». С 2014 года – докторант НИУ МГСУ (НОЦ КМ), развивает исследования по своей теме.

Один из ведущих в России специалистов по разработке и использованию методик в наукоемких исследованиях сильно нелинейных и/или динамических задач для уникальных объектов строительства. Некоторые из них: полный цикл «аварийное воздействие – деформирование – локальное разрушение – прогрессирующее обрушение» уникальных зданий, нелинейные модели материалов, геометрически нелинейные задачи устойчивости и закритического поведения, сейсмические расчеты во временной области.

Виртуозно владеет программными комплексами ANSYS Mechanical, LS-DYNA, ЛИРА-САПР и SCAD.

Послужной список объектов включает: реконструктивный анализ обрушения СОК «Трансвааль-парк» («доведение до земли»), большепролетное здание на ВДНХ (расчеты на прогрессирующее обрушение), **полный цикл расчетов металлических конструкций покрытий и фасадов стадионов к ЧМ-2018 по футболу (Волгоград, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Екатеринбург)**, торгово-развлекательный комплекс «Город Горки Молл» в Красной Поляне (к олимпиаде 2014 года и мониторинг).

В 2014-2015 году был ответственным исполнителем по НИР, выигранной на конкурсной основе в РААСН. Опубликовал более 20 научных работ.

2. История (до 2013 года) – объекты и задачи

Современное проектирование и строительство уникальных зданий и сооружений немислимо без расчетного обоснования и глубоких всесторонних исследований поведения несущих конструкций под действием разного рода воздействий.

Одними из наиболее грандиозных и ответственных объектов строительства являются уникальные большепролетные сооружения, такие как: стадионы, дворцы спорта и аквапарки, торгово-развлекательные комплексы, пешеходные автомобильные и железнодорожные мосты различных конструктивных решений.

Научно-исследовательским центром СтаДиО за последние 15 лет, в рамках строительно-технических экспертиз, выполнен анализ возможных причин локальных разрушений и прогрессирующего обрушения конструкций покрытия ряда большепролетных зданий. среди них спортивно-оздоровительный комплекс «Трансвааль парк» [1], Басманный рынок [4], крытый конькобежный центр «Крылатское») и производственный цех [3].

По выводам представленных экспертиз были предложены, реализованы и/или нормативно закреплены для уникальных зданий и сооружений:

- разработка специальных технических условий СТУ для проектирования уникальных объектов строительства;
- «независимые» расчёты по двум (а если необходимо, то и более) альтернативным расчетным моделям и верифицированным программным комплексам с содержательным сопоставлением результатов по основным критериям параметрам;
- разработка и реализация обязательной системы мониторинга конструкций для стадий возведения и эксплуатации;
- верификация программных средств по правилам утверждённым РААСН;
- организация в 2006 году и плодотворная работа научного совета РААСН «Программные средства в строительстве и архитектуре», международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», международной ежегодной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»).

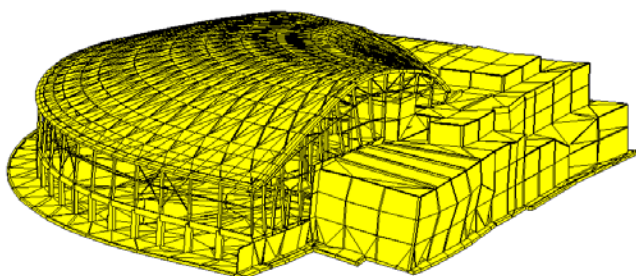


Рис.2.1. Спортивно-оздоровительный комплекс «Трансвааль парк»

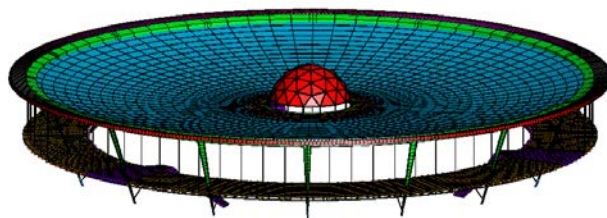


Рис.2.2. Басманный рынок

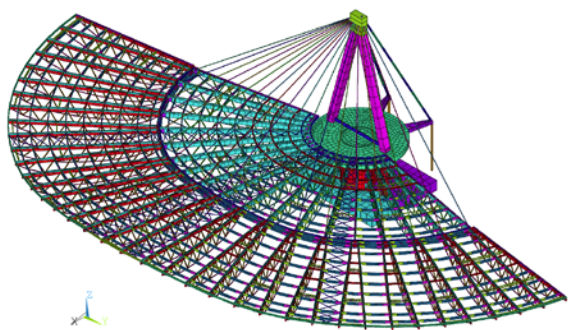


Рис.2.3. Крытый конькобежный центр «Крылатское»

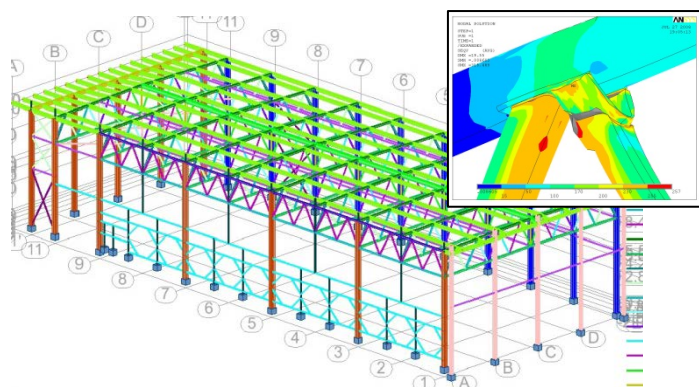
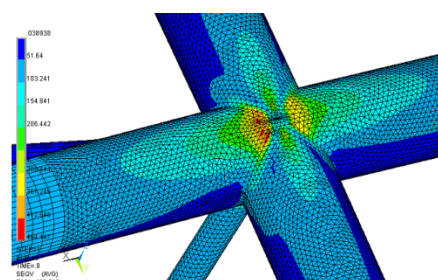
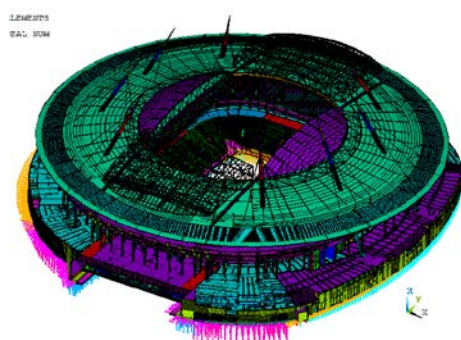
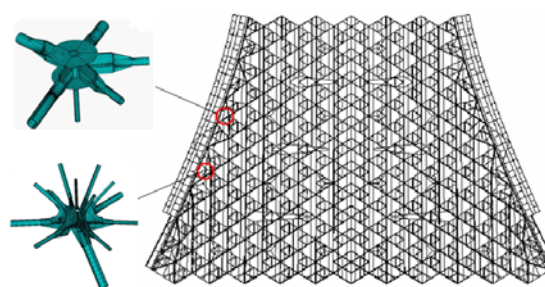
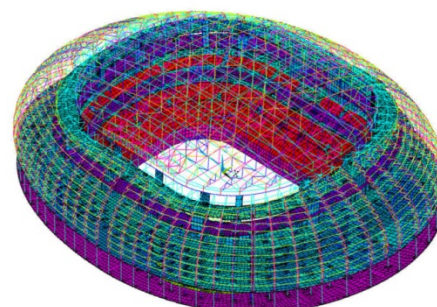
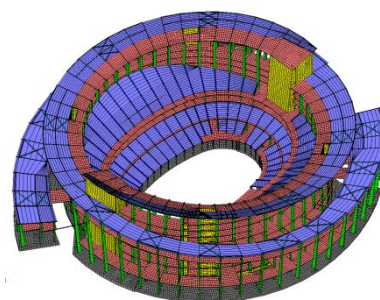


Рис.2.4. Производственный цех

В дальнейшем, опираясь на богатый экспертный опыт, научно-исследовательским центром СтаДиО успешно выполнен значительный комплекс расчетных исследований большепролетных сооружений и узлов их конструкций:

- 2005г. Экспертные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния несущих конструкций ледового дворца спорта на Ходынском поле («Мегаспорт») г.Москва [2];
- 2009-2010гг. Уточненные расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих железобетонных и металлических конструкций Большой ледовой арены для хоккея с шайбой. Уточненные расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих железобетонных и металлических конструкций Большой ледовой арены для хоккея с шайбой г.Сочи [5];
- 2010г. Расчетные исследования пространственного напряженно-деформированного состояния и несущей способности металлоконструкций покрытия основного здания аэровокзального комплекса „Внуково-1“ (блока б), включая трехмерный физически нелинейный конечноэлементный анализ узлов сопряжения ферм, г.Москва [7];
- 2010-2012гг. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих железобетонных и металлических конструкций проектируемого футбольного стадиона «Зенит» (г. Санкт-Петербург, Крестовский остров, стадия «П») при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий, прохождение Главгосэкспертизы России [8].
- В 2011г. расчетные исследования трехмерного упруго-пластического напряженно-деформированного состояния узлов сопряжения ферм покрытия стадиона „Спартак“ в г. Москва [6].



3. Стадионы к чемпионату мира по футболу 2018 года (объекты, вошедшие в заявку)

В 2018 году Россия готовится принять у себя Чемпионат Мира по футболу, который пройдет в период с 14 июня по 15 июля. Подготовка к этому мероприятию требует значительных затрат и, в первую очередь, проектирования и строительства новых весьма вместительных стадионов, отвечающие современным требованиям безопасности и критериям FIFA.

К проведению чемпионата построены и реконструированы 12 футбольных стадионов:

- *Стадион «Лужники», г.Москва. Реконструирован в 2017г;*
- *Санкт-Петербург Арена («Зенит»), г.С-Петербург. Стр-во завершено в 2017г;*
- *«Открытие Арена» («Спартак»), г.Москва. Строительство завершено в 2014г;*
- *«Казань Арена», г.Казань. Строительство завершено в 2013г;*
- *«Нижний Новгород Арена». г.Н.Новгород. Строительство завершено в 2017г;*
- *«Волгоград Арена». г.Волгоград. Строительство завершено в 2017г;*
- *«Ростов Арена» г.Ростов-на-Дону. Строительство завершено в 2017г;*
- *«Екатеринбург Арена». г.Екатеринбург. Строительство завершено в 2017г;*
- *«Самара Арена». г.Самара. Строительство завершено в 2018г;*
- *«Мордовия Арена». г.Саранск. Строительство завершено в 2017г;*
- *«Арена Балтика». г.Калининград. Строительство завершено в 2017г;*
- *«Фишт», г.Сочи. Построен в 2013г к XXII зимним Олимпийским играм.*

Жирным курсивом в выше приведенном списке выделены стадионы, в расчетном обосновании механической безопасности конструкций которых в разное время принимали участие специалисты Научно-исследовательского центра СтаДиО.

В период с апреля 2013 по январь 2018 года (последние 5 лет, согласно условиям конкурса РААСН) коллективом Научно-исследовательского центра СтаДиО под руководством Белостоцкого Александра Михайловича, выполнен комплекс работ по научно-техническому сопровождению проектов – расчетному обоснованию механической безопасности (напряженно-деформированного состояния (НДС), динамики, прочности и устойчивости) пространственных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года (в *Самаре, Нижнем Новгороде, Волгограде, Ростове-на-Дону, Екатеринбурге*) при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий.

Наиболее важные результаты выполненного комплекса НИР приведены в данном описании работы. Описание проектов упомянутых стадионов (грунтовое или свайно-грунтовое основание, конструкции фундаментов и чаши трибун, покрытия и фасадов, нагрузки и воздействия и т.п.) и результаты расчетных исследований представлены в соответствующих научно-технических отчетах по каждому из указанных стадионов (фрагменты отчетов приложены в качестве дополнительных материалов, а также в полном объеме представлены на электронном носителе).

Пример характерных конечноэлементных моделей пространственной комбинированной системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» одного из стадионов (а также составляющих её подсистем) приведен на иллюстрациях ниже.

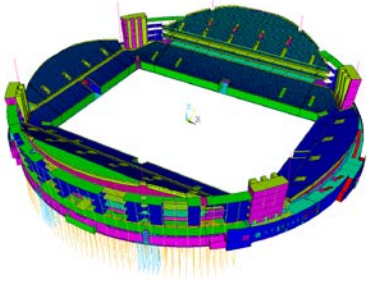
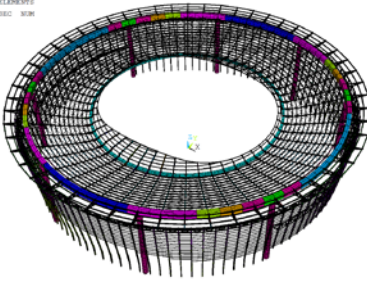
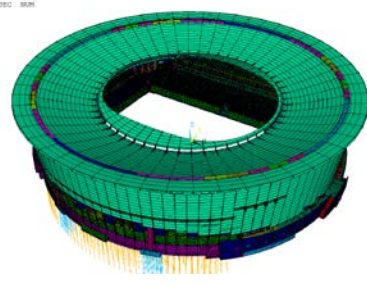
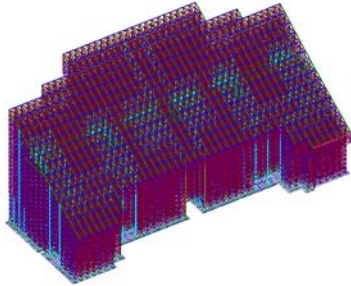
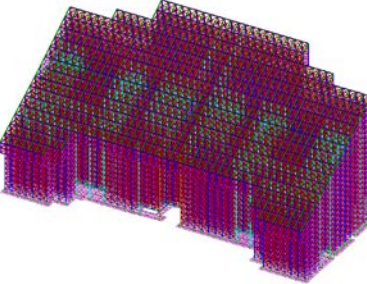
№	КЭ-модели системы/подсистемы	Изображение	Количество узлов	Количество элементов	Программный комплекс/ Типы КЭ
1	“свайно-грунтовое основание – железобетонные конструкции чаши стадиона”		296 960	355 555	ANSYS Mechanical SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154 COMBIN14
2	“металлические конструкции покрытия (навеса) и фасадов”		8 956	16 088	ANSYS Mechanical SHELL181 BEAM188 LINK180 MPC184 SURF154
3	“свайно-грунтовое основание – железобетонные конструкции чаши стадиона – металлические конструкции покрытия (навеса) и фасадов ”		301 630	367 623	ANSYS Mechanical SHELL181 BEAM188 LINK180 MPC184 SURF154 COMBIN14
4	несущие конструкции северной сборно-разборной трибуны		43 566	117 964	SCAD Office 5 42 44 51 100
5	несущие конструкции южной сборно-разборной трибуны		41 468	114 109	SCAD Office 5 42 44 51 100

Рис.3.1. Разработанные расчетные КЭ-модели несущих конструкций стадиона в г.Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК SCAD Office

Перечень НИР (по конкурсной заявке, в 2013-2018 гг.), выполненных авторским коллективом, с указанием наименований работ и сроков их выполнения приведен ниже.

Таблица 3.1.

№	Название научно-исследовательской работы	Даты выполнения
1	Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий” для Объекта – “Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Самара.	29.04.2013-20.10.2013
2	Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций, при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий” для Объекта – “Строительство стадиона на 45 000 зрителей для проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года, г. Нижний Новгород”	29.04.2013-20.10.2013
3	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий” для Объекта – “Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, д.76	29.04.2013-20.10.2013
4	Результаты научно-технического сопровождения проектирования надземной части по объекту: "Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Ростов-на-Дону, в левобережной зоне"	29.04.2014-20.09.2014
5	Научно-методическое сопровождение проектирования (стадия РД) Объекта – «Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская. ул. Самаркандская»	29.09.2014-15.02.2015
6	Научно-методическое сопровождение проектирования (стадия РД) Объекта – «Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д.76	29.09.2014-15.02.2015
7	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций, при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий” для Объекта – «Проектирование и строительство стадиона с инфраструктурой в Екатеринбурге»	25.02.2015-15.06.2015
8	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности, устойчивости и зыбкости конструкций временных трибун для Объекта — „Реконструкция и реставрация объекта культурного наследия „Стадион „Центральный“. Комплекс“ вместимостью 35000 зрительских мест, г.Екатеринбург, ул. Репина, д. 5“	30.04.2015-15.06.2015
9	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий по откорректированной проектной документации Объекта – «Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская, ул. Самаркандская	29.07.2015-29.08.2015
10	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированных несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта — «Стадион с инфраструктурой в г. Волгограде для проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года»	29.07.2015-29.08.2015

№	Название научно-исследовательской работы	Даты выполнения
11	Расчетная оценка несущей способности трапециевидных железобетонных колонн с учетом выполненных СМР на объекте «Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д.76	15.07.2016- 15.09.2016
12	Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий по откорректированной проектной документации Объекта – „Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская, ул. Самаркандская“	15.09.2016- 15.11.2016
13	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий для объекта «Реконструкция и реставрация объекта культурного наследия «Стадион Центральный. Комплекс» вместимостью 35 000 зрительских мест, г. Екатеринбург, ул. Репина, д.5	07.02.2017- 25.04.2017
14	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированных несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта — «Стадион с инфраструктурой в г. Волгограде для проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года»	15.09.2017- 25.12.2017
15	Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости с учетом оптимизированного варианта фасада при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий для Объекта – „Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская, ул. Самаркандская“	15.11.2017- 25.01.2018

Работы №1-3 и 5-15 выполнены по заказу ООО «Проектный институт уникальных зданий сооружений «Арена» («ООО ПИ «Арена»)

Работа №4 (Ростов-на-Дону, «Левбердон») выполнена по заказу Федерального государственного унитарного предприятия «Спорт-Инжиниринг» (ФГУП «Спорт-Ин»)

Стадион в г. Самара «Самара Арена»



Рис.3.2. Архитектурный проект стадиона в г.Самара

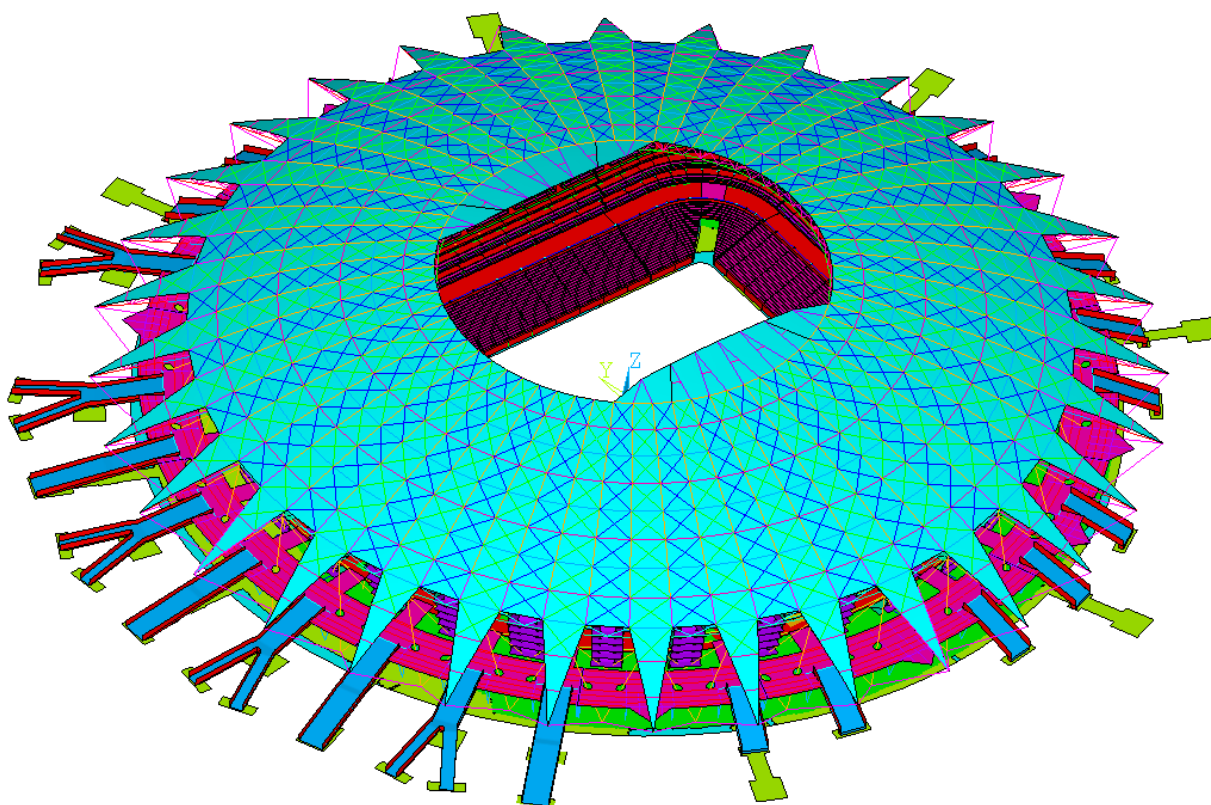


Рис.3.3. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г.Самара (ПК ANSYS Mechanical)

Стадион в г. Самара «Самара Арена»

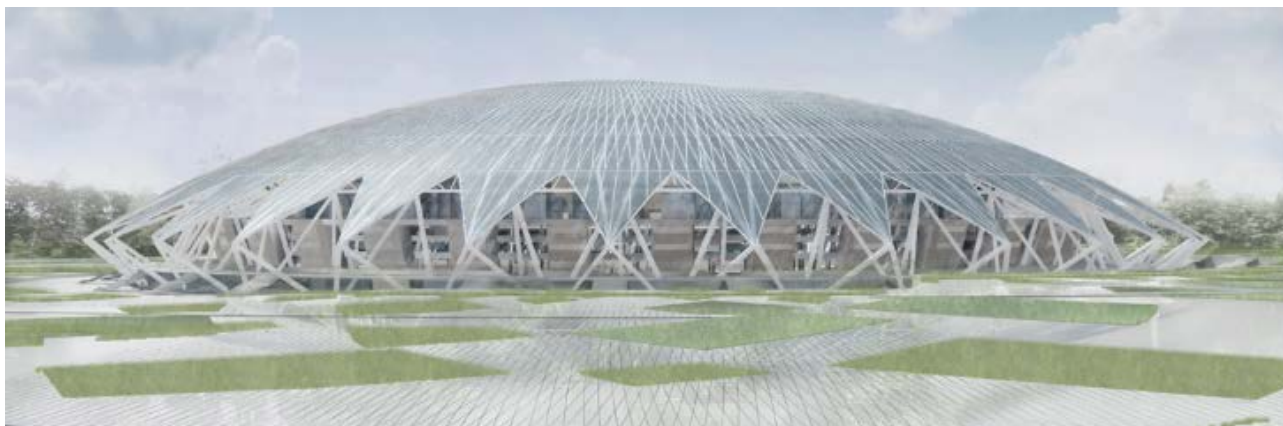


Рис.3.4. Архитектурный проект стадиона в г.Самара

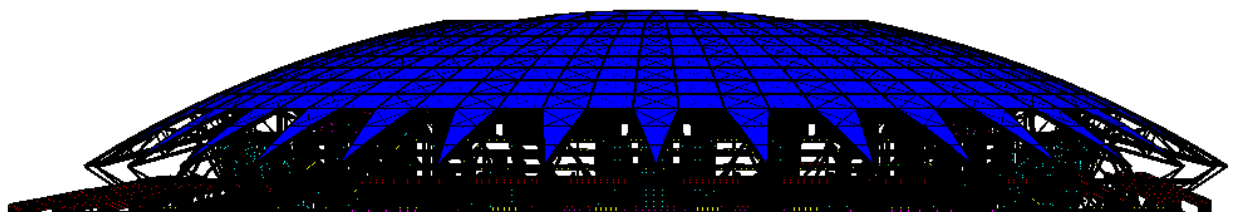


Рис.3.5. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г.Самара (ПК ANSYS Mechanical)



Рис.3.6. Фотография стадиона в г.Самара (по состоянию на ноябрь 2017г.).

Стадион в г. Нижний Новгород «Нижний Новгород Арена»



Рис.3.7. Архитектурный проект стадиона в г.Нижний Новгород

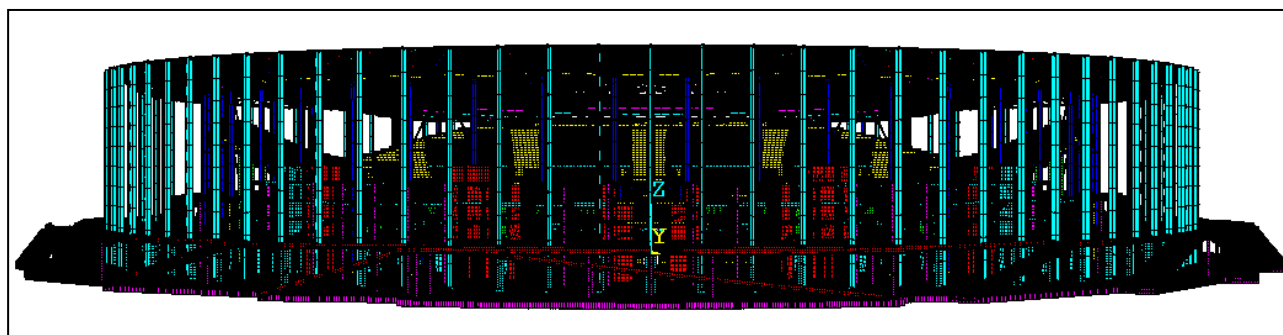


Рис.3.8. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical)



Рис.3.9. Фотография стадиона в г. Нижний Новгород (по состоянию на декабрь 2017г.).

Стадион в г. Нижний Новгород «Нижний Новгород Арена»

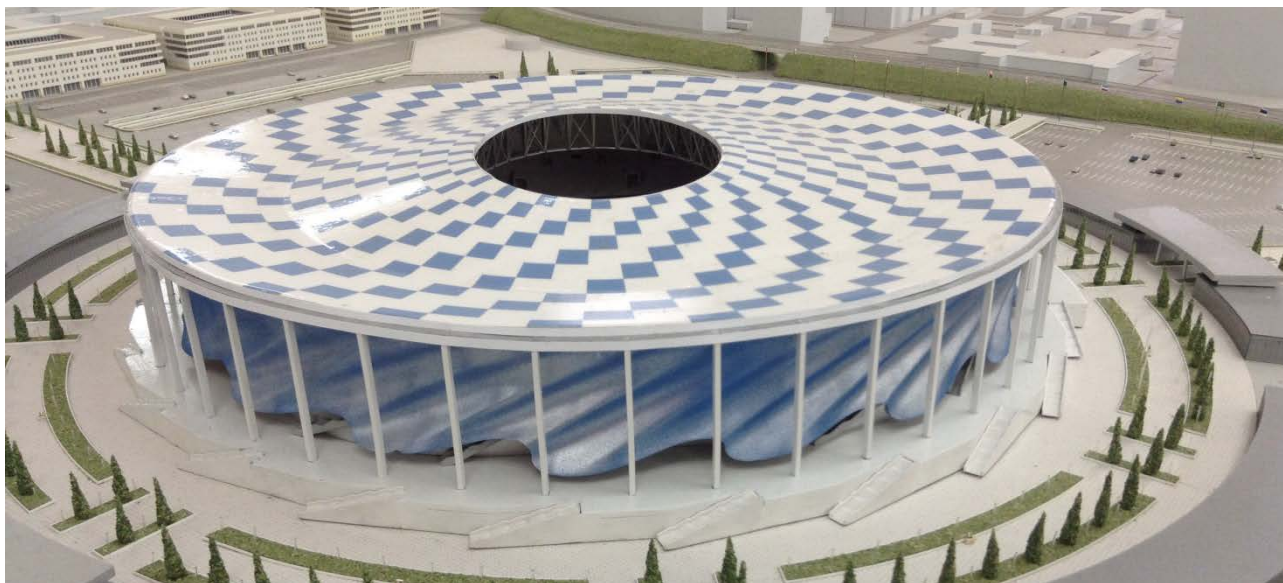


Рис.3.10. Архитектурный проект стадиона в г.Нижний Новгород

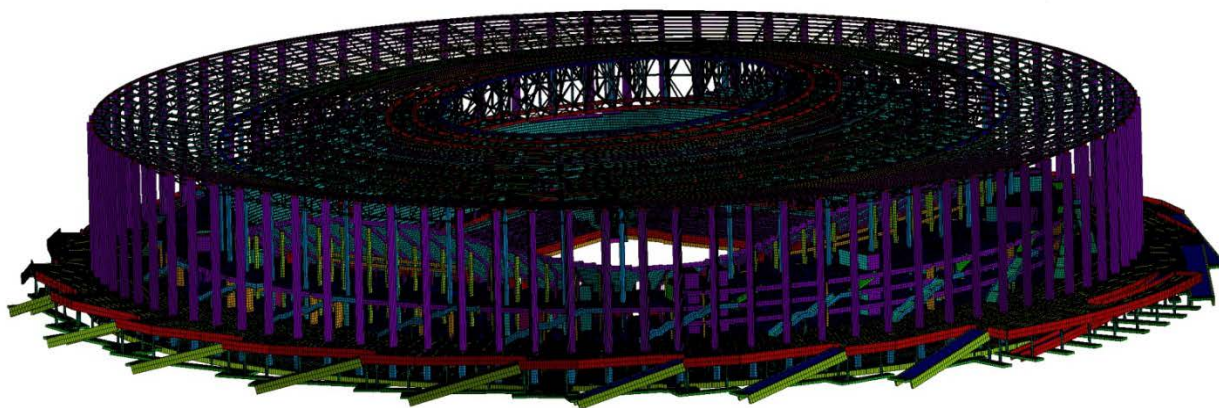


Рис.3.11. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical)



Рис.3.12. Фотография стадиона в г. Нижний Новгород (по состоянию на декабрь 2017г.).

Стадион в г. Волгоград «Волгоград Арена»

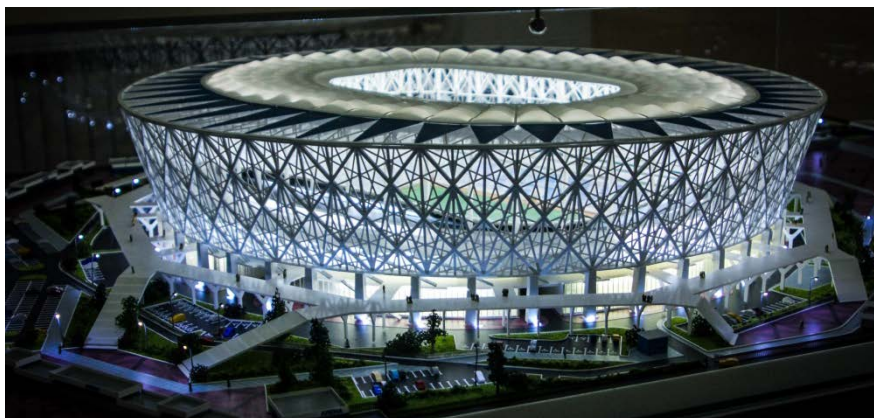


Рис.3.13. Архитектурный проект стадиона в г.Волгоград

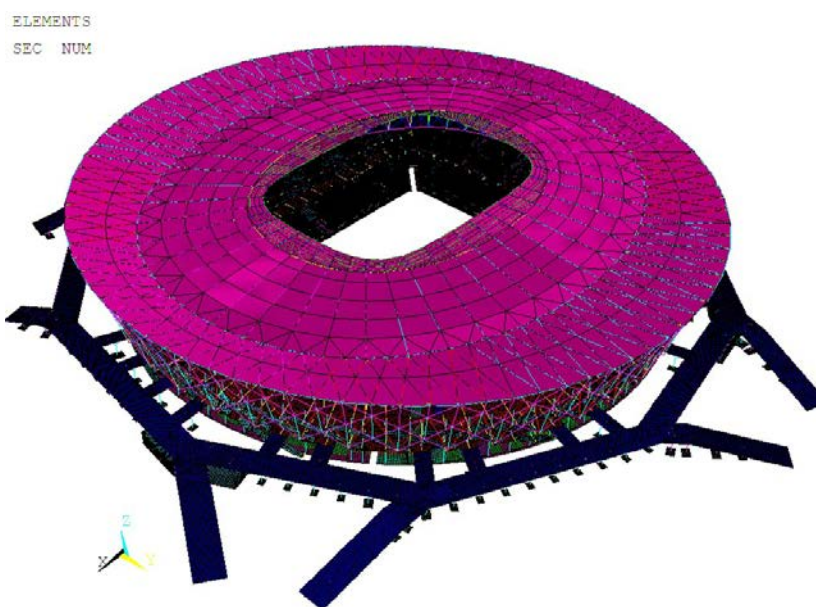


Рис.3.14. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Волгоград (ПК ANSYS Mechanical)



Рис.3.15. Фотография стадиона в г. Волгоград (по состоянию на ноябрь 2017г.).

Стадион в г. Волгоград «Волгоград Арена»

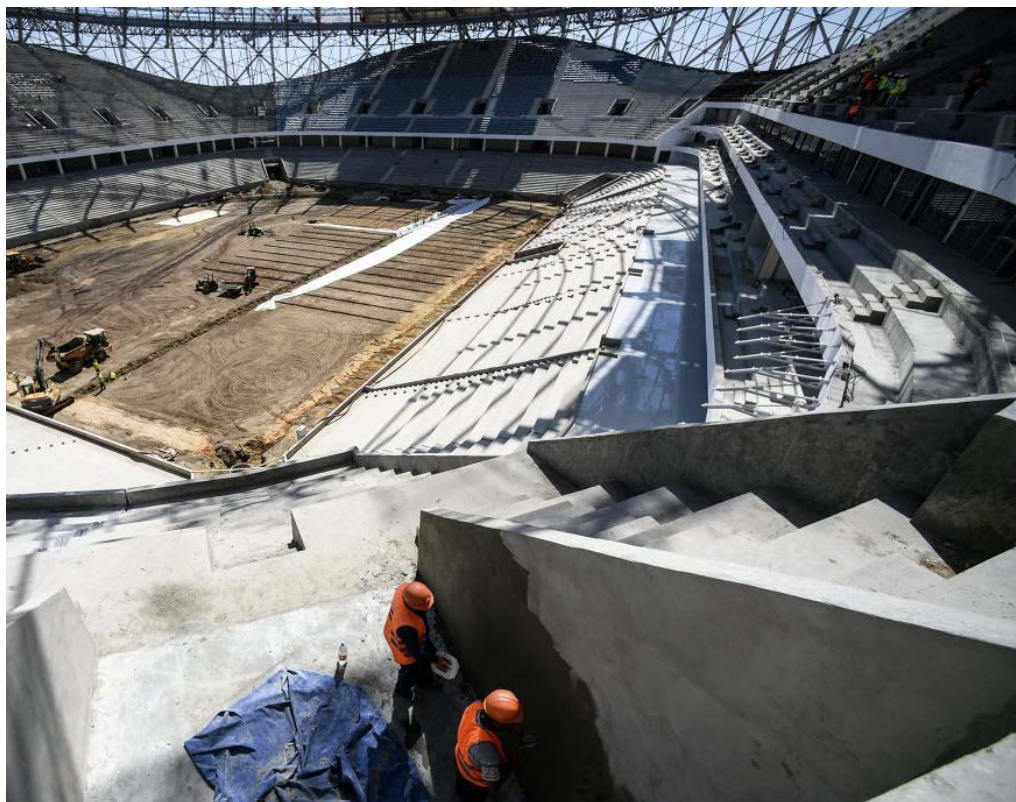


Рис.3.16. Фотография стадиона в г. Волгоград во время строительства (по состоянию на лето 2017г.)

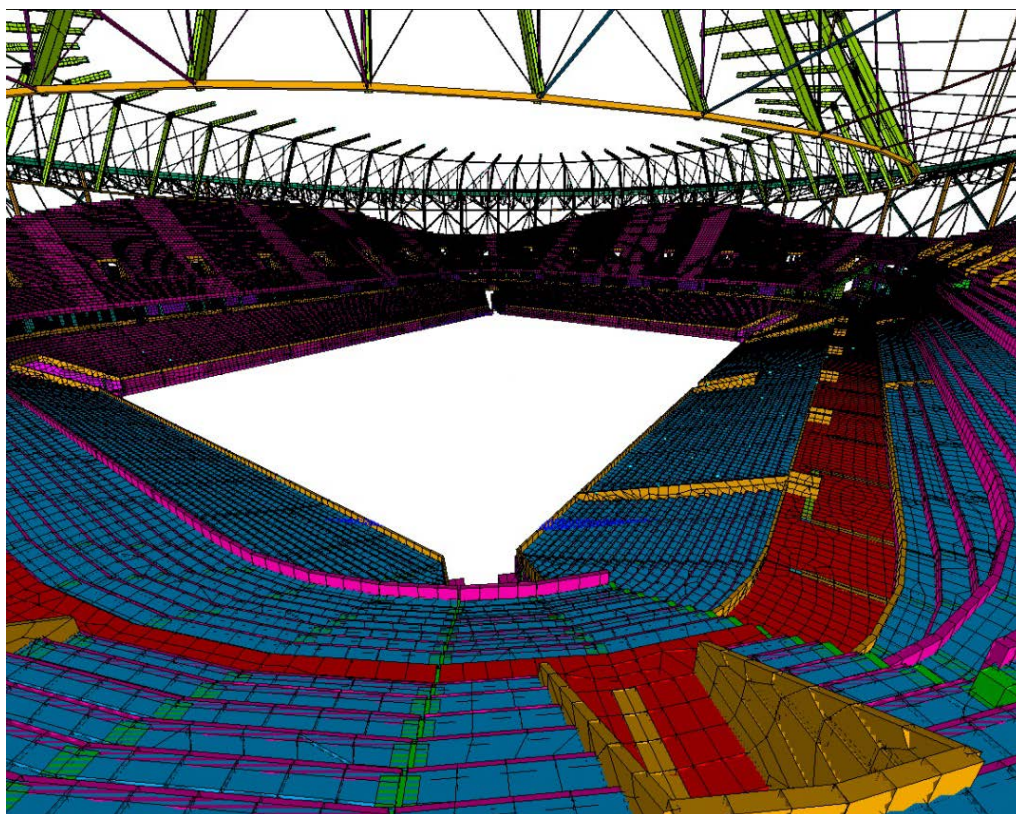


Рис.3.17. Фрагмент разработанной трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Волгоград (ПК ANSYS Mechanical)

Стадион в г. Ростов-на-Дону «Ростов-на-Дону Арена»

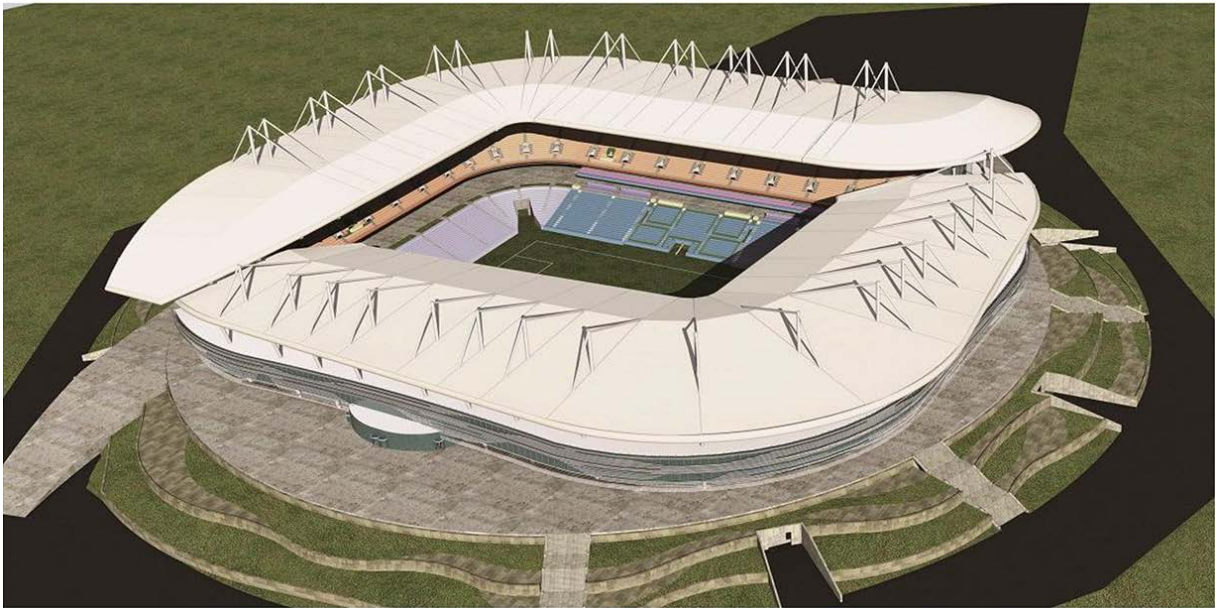


Рис.3.18. Первоначальный архитектурный проект стадиона в г.Ростов-на-Дону

ELEMENTS
: NUM

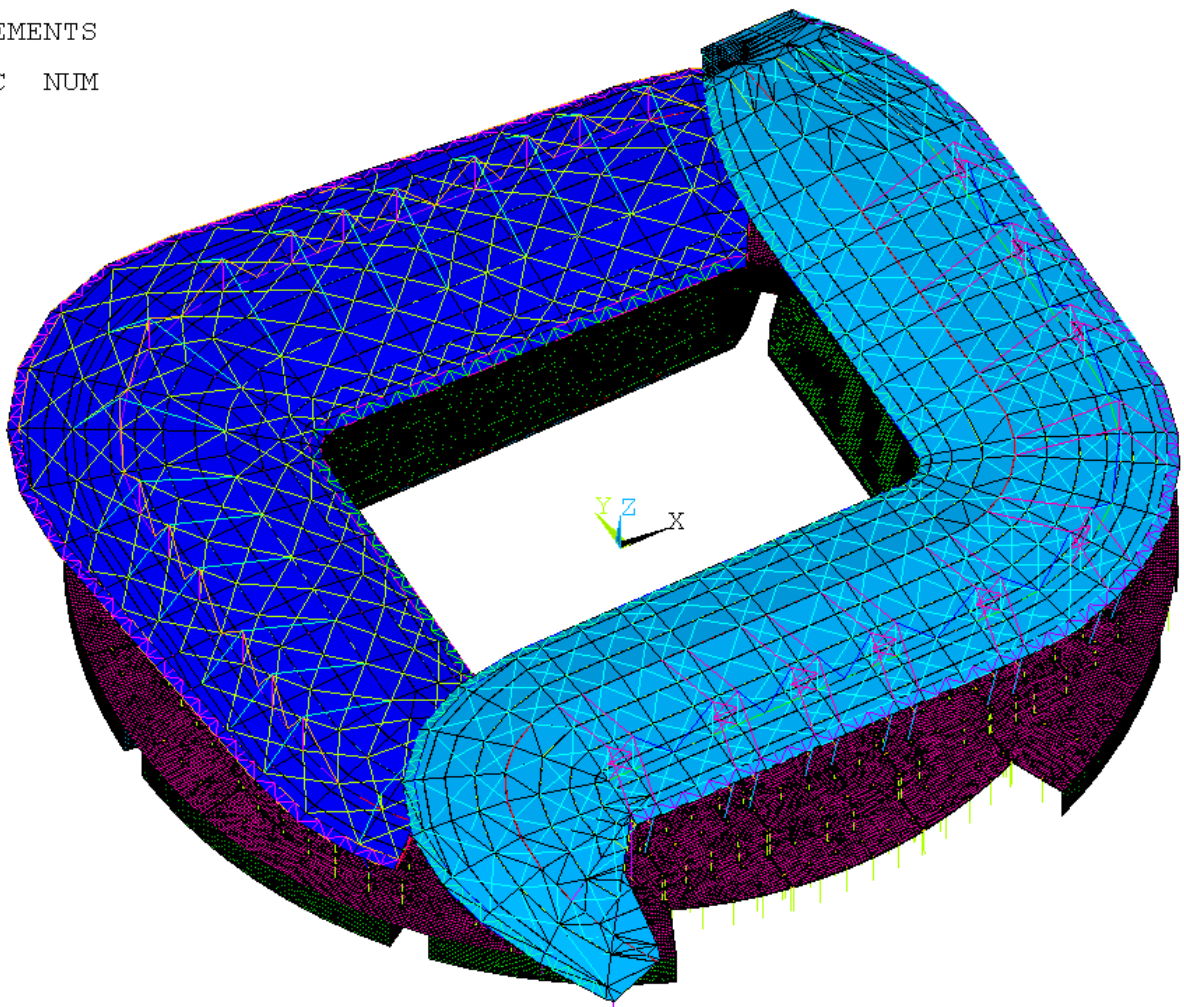


Рис.3.19. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Ростов-на-Дону (ПК ANSYS Mechanical)

Стадион в г. Ростов-на-Дону «Ростов-на-Дону Арена»



Рис.3.20. Реализованный архитектурный проект стадиона в г. Ростов-на-Дону

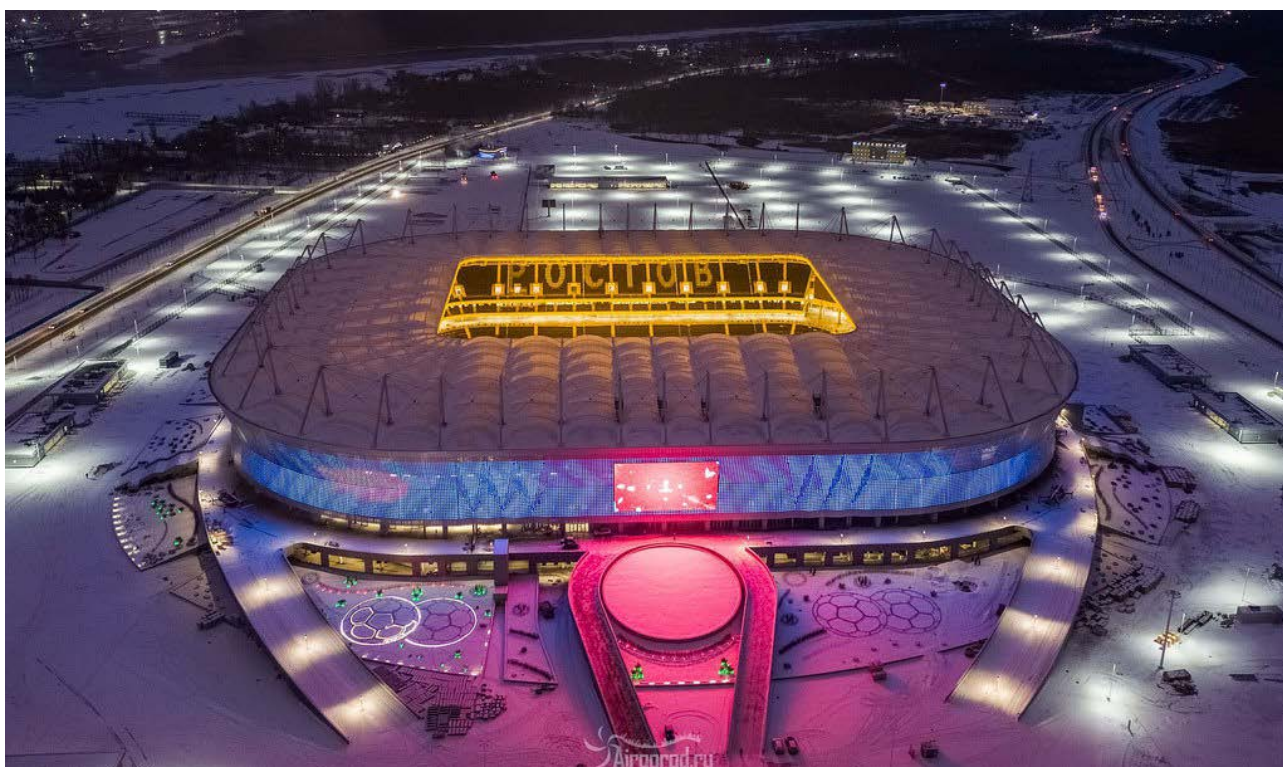


Рис.3.21. Фотография стадиона в г. Ростов-на-Дону (декабрь 2017г.).

Стадион в г. Екатеринбург «Екатеринбург Арена»

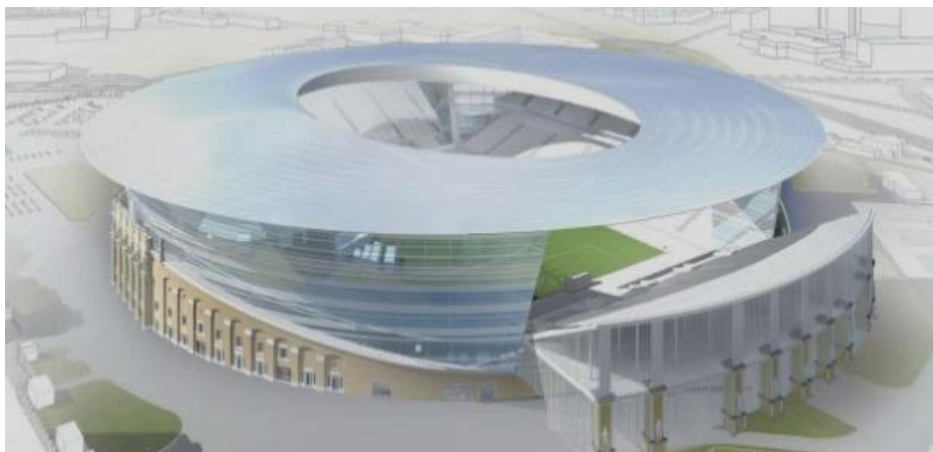


Рис.3.22. Архитектурный проект стадиона в г. Екатеринбург

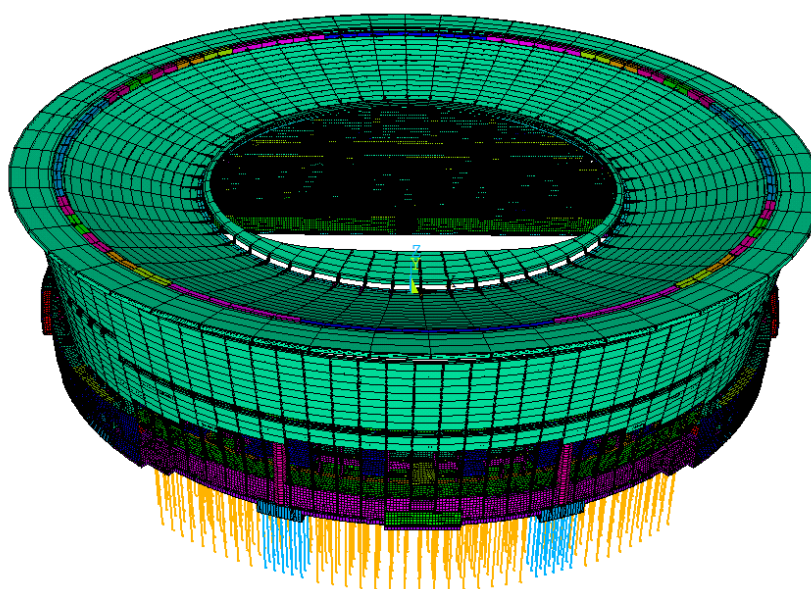


Рис.3.23. Разработанная трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Екатеринбург (ПК ANSYS Mechanical)



Рис.3.24. Фотография стадиона в г. Екатеринбург (декабрь 2017г).

Стадион в г. Екатеринбург «Екатеринбург Арена»



Рис.3.25. Фотография стадиона в г. Екатеринбург во время строительства (по состоянию на октябрь 2017г.)

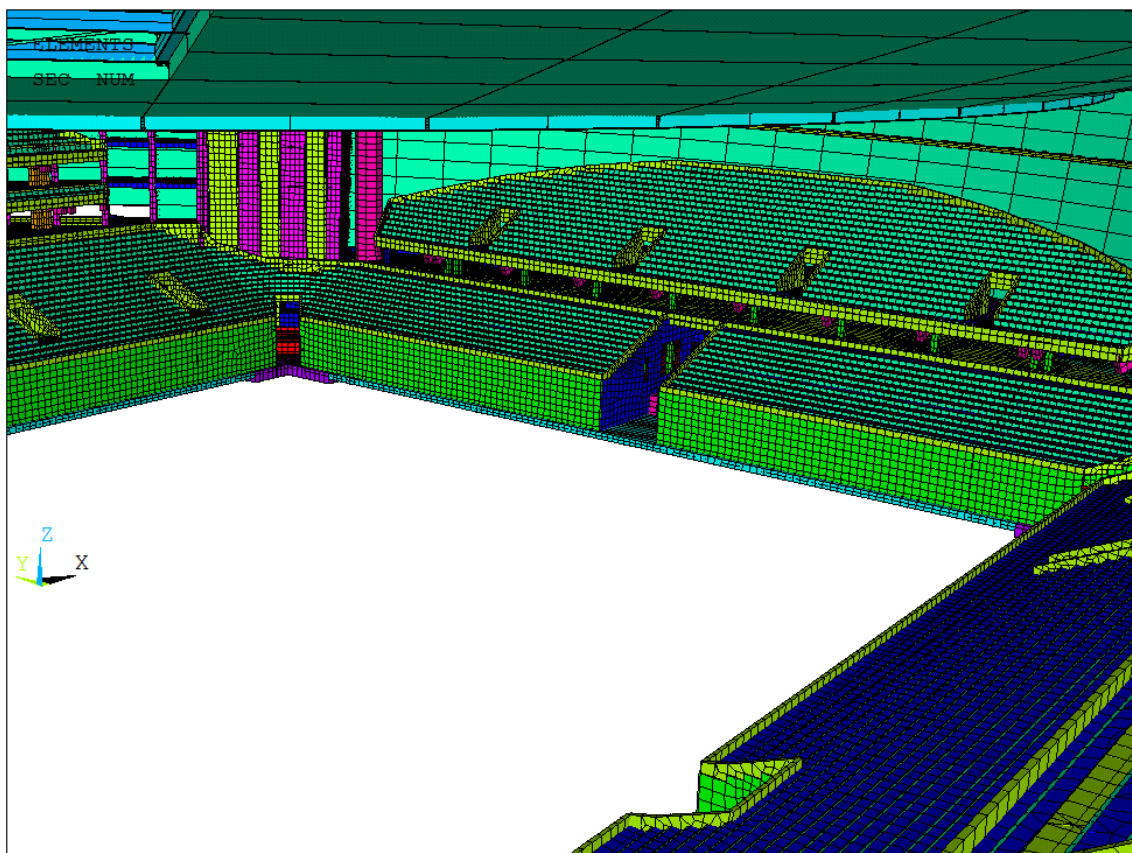


Рис.3.26. Фрагмент разработанной трехмерная оболочечно-стержневая КЭ-модель стадиона в г. Екатеринбург (ПК ANSYS Mechanical)

Стадион в г. Екатеринбург «Екатеринбург Арена»



Рис.3.27. Фотография стадиона в г. Екатеринбург во время строительства (по состоянию на октябрь 2017г.). Вид с временной сборно-разборной трибуны.



Рис.3.28. Специалисты Научно-исследовательского центра СтаДиО. Фотография стадиона в г. Екатеринбург во время строительства (по состоянию на октябрь 2017г.).



Рис.3.29. Специалисты Научно-исследовательского центра СтаДиО.
Фотография стадиона в г. Екатеринбург во время строительства
(по состоянию на октябрь 2017г.)

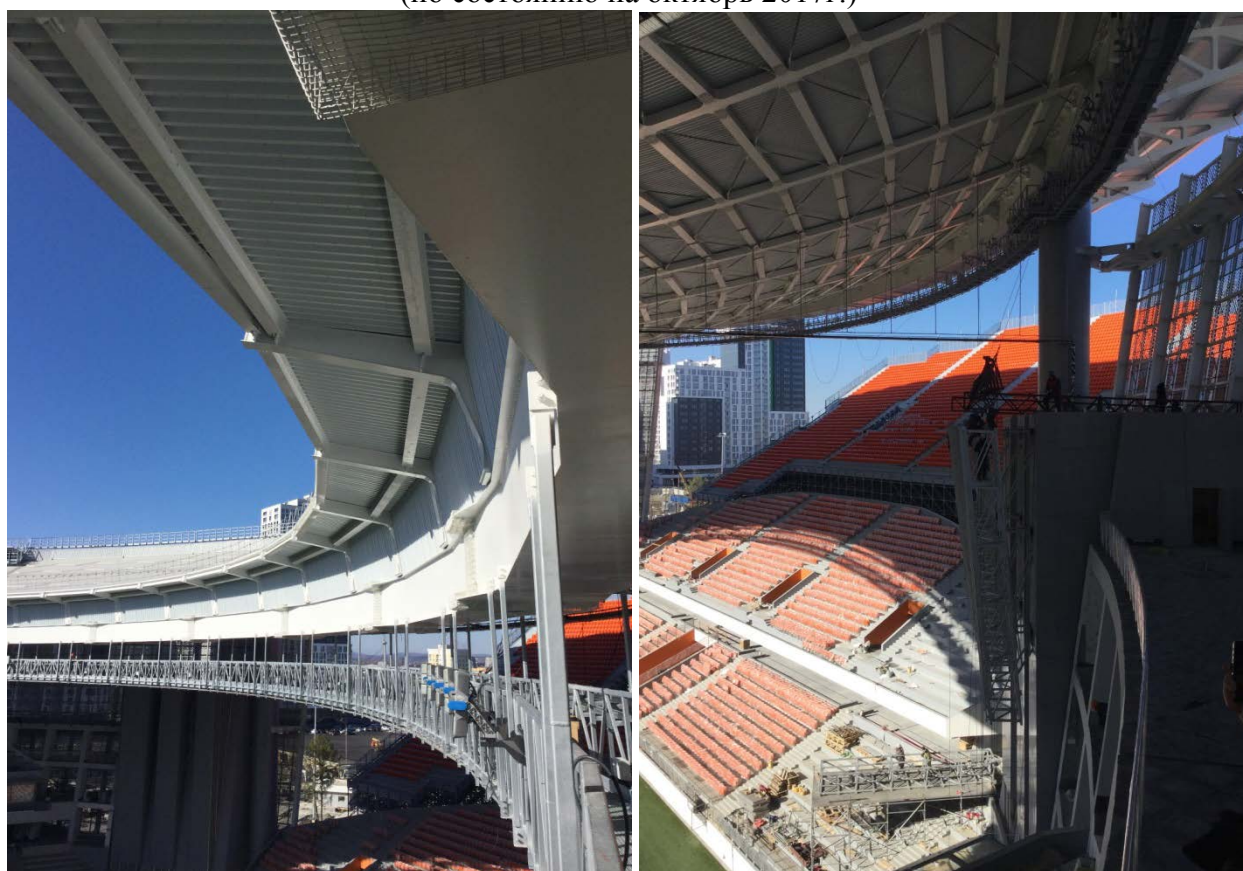


Рис.3.30. Фотография стадиона в г. Екатеринбург во время строительства (по состоянию на октябрь 2017г.)

Стадион в г. Екатеринбург «Екатеринбург Арена»

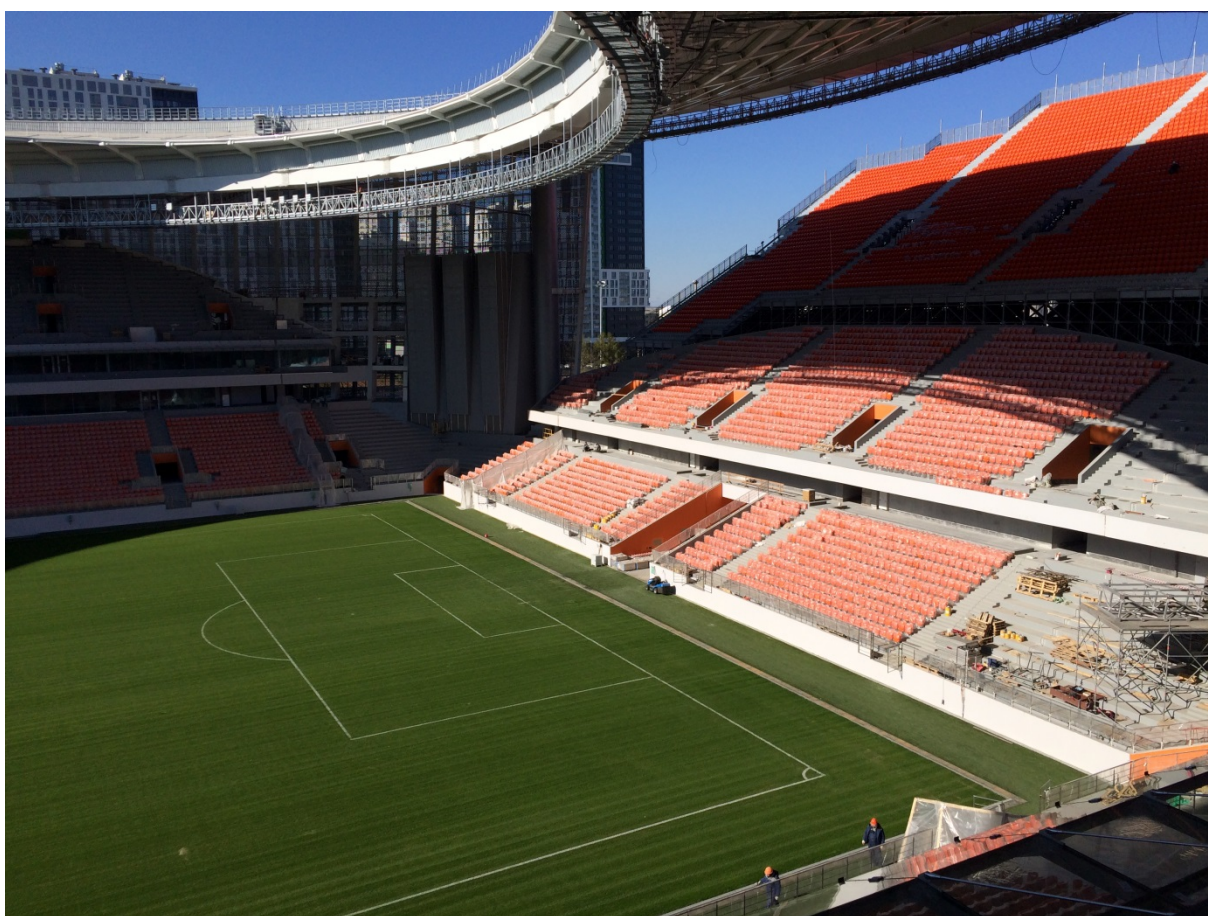
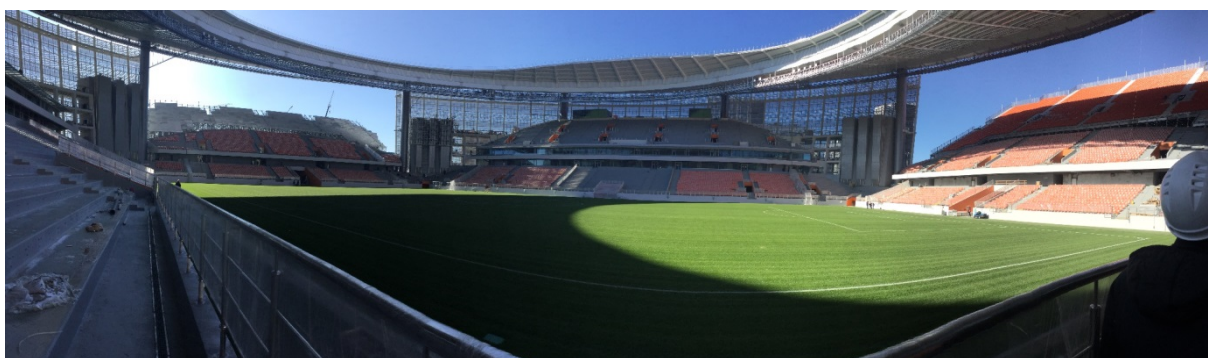


Рис.3.31. Фотографии стадиона в г. Екатеринбург во время строительства (по состоянию на октябрь 2017г.).

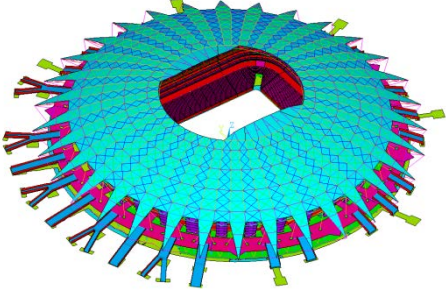
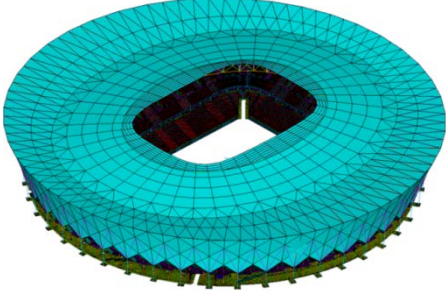
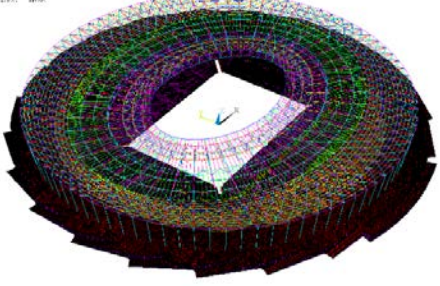
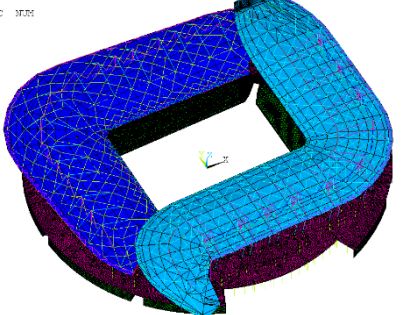
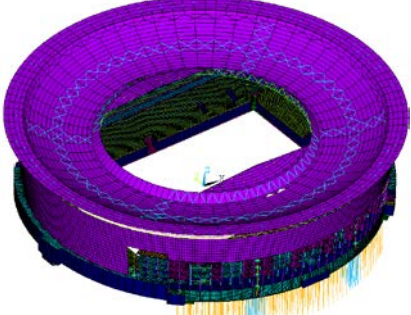
КЭ-модель стадиона	Вычислительная размерность
	<p style="text-align: center;">1 994 450 узлов 2 399 271 элементов</p>
г. Самара («Самара Арена»)	
	<p style="text-align: center;">540 761 узлов 583 783 элементов</p>
г. Волгоград («Волгоград Арена»)	
	<p style="text-align: center;">680 127 узлов 811 522 элементов</p>
г. Нижний Новгород («Нижний Новгород Арена»)	
	<p style="text-align: center;">480 109 узлов 704 013 элементов</p>
г. Ростов-на-Дону («Ростов Арена»)	
	<p style="text-align: center;">312 636 узлов 350 382 элементов</p>
г. Екатеринбург («Екатеринбург Арена»)	

Рис.3.32. Общие виды разработанных трехмерных оболочечно-стержневых КЭ-моделей футбольных стадионов (ПК ANSYS Mechanical), с указанием их вычислительных размерностей

4. Основные проблемы и достижения в расчетном обосновании стадионов

В процессе выполнения перечисленных работ авторский коллектив выявил ряд характерных особенностей расчетного обоснования напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости несущих конструкций стадионов при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий, выполненного по необходимости в сложных постановках с применением современных подходов численного моделирования в верифицированных программных комплексах.

Ниже приведены наиболее значимые из них:

- впервые достигнутый уровень адекватности и, как следствие, большая вычислительная размерность (до 12 000 000 неизвестных) и многовариантность (сочетания основных и особых нагрузок и воздействий) конечноэлементных моделей и задач;
- сравнительный анализ параметров НДС и динамических характеристик (значимой части спектра собственных частот и форм колебаний) полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем «металлические конструкции покрытия» и «основание – железобетонные конструкции трибун», позволяющий обосновать возможность исследования подсистем в рамках сепаратных моделей различными коллективами конструкторов-расчетчиков;
- моделирование неоднородного грунтового основания и свайного поля, содержащего до одиннадцати тысяч свай;
- многоитерационный процесс дополнения и корректировки положения и характеристик несущих конструкций стадионов на основании результатов статических и динамических расчетов, в том числе, для удовлетворения критериям зыбкости конструкции «гребенки» трибун;
- уточненный трехмерный физически нелинейный КЭ-анализ НДС и прочности наиболее напряженных конструктивных узлов металлических покрытий с учетом реальной диаграммы деформирования;
- расчет на устойчивость металлических конструкций покрытий и фасада с учетом физической и геометрической нелинейностей и начальных несовершенств;
- геометрически нелинейное моделирование предварительно напряженных вантовых элементов в составе конструкций покрытия, в том числе, при расчете на прогрессирующее обрушение;
- динамические расчеты системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» на сейсмические воздействия уровня ПЗ (по линейно-спектральной методике на трехкомпонентные спектры ускорений) и МРЗ (прямым интегрированием уравнений движения на трехкомпонентные акселерограммы);
- оптимизационный процесс дополнения и корректировки конструкций сборно-разборных (временных) трибун для удовлетворения критериев прочности и устойчивости несущих элементов конструкции и динамической комфортности (зыбкости) трибун;
- сопоставление результатов альтернативных расчетов, выполненных согласно требованиям специальных технических условий, в верифицированных/сертифицированных программных комплексах. Для моделей подсистем «металлические конструкции покрытия» – ANSYS, MIDAS Civil, Robot Structural, SOFiStiK; для моделей подсистемы «основание – железобетонные конструкции чаши» – ANSYS, SCAD, Лира, SOFiStiK;
- научно-техническое сопровождение прохождения в ФАУ «Главгосэкспертиза России» в части расчетного обоснования проектов упомянутых стадионов.

4.1. Подробность - вычислительная размерность КЭ-моделей.

Одной из важных особенностей, с которой приходится сталкиваться при моделировании таких грандиозных сооружений, как футбольные стадионы, является «экстремальная» вычислительная размерность задач, со всеми вытекающими последствиями. Очевидная сложность заключается в анализе и обработке значительного объема проектной и нормативной документации и построения в точном соответствии с ними подробной геометрической, а затем и конечноэлементной модели системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов», включающей в себя внушительное (порядка нескольких сотен) количество типов сечений, жесткостей, материалов конструкций. Возникает и задача выбора оптимального типа конечных элементов (КЭ) и шага разбиения модели на КЭ, со сгущением сетки в зонах, требующих особого внимания, при этом сохраняя вычислительную размерность, адекватную имеющемуся в распоряжении «железу» и программному обеспечению. Первая задача решается зачастую за счет опыта и квалификации расчетчиков, вторая же требует применения параллельных решателей, использования «тяжелого» софта и/или обоснования разделения полной модели на подсистемы и исследование их в рамках сепаратных моделей либо применение суперэлементных технологий. Обоснование возможности перехода к сепаратным моделям подсистем выделено в отдельную особенность, которая подробно описана ниже (в п.4.2).

Вычислительная размерность КЭ-модели стадиона в г. Самара [9] *1 994 450 узлов и 2 399 271 элементов, т.е. порядка 11 966 700 степеней свободы* при среднем размере конечного элемента около 0,5м. Задачи такой размерности были успешно решены при расчетном обосновании напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости несущих конструкций стадионов при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий

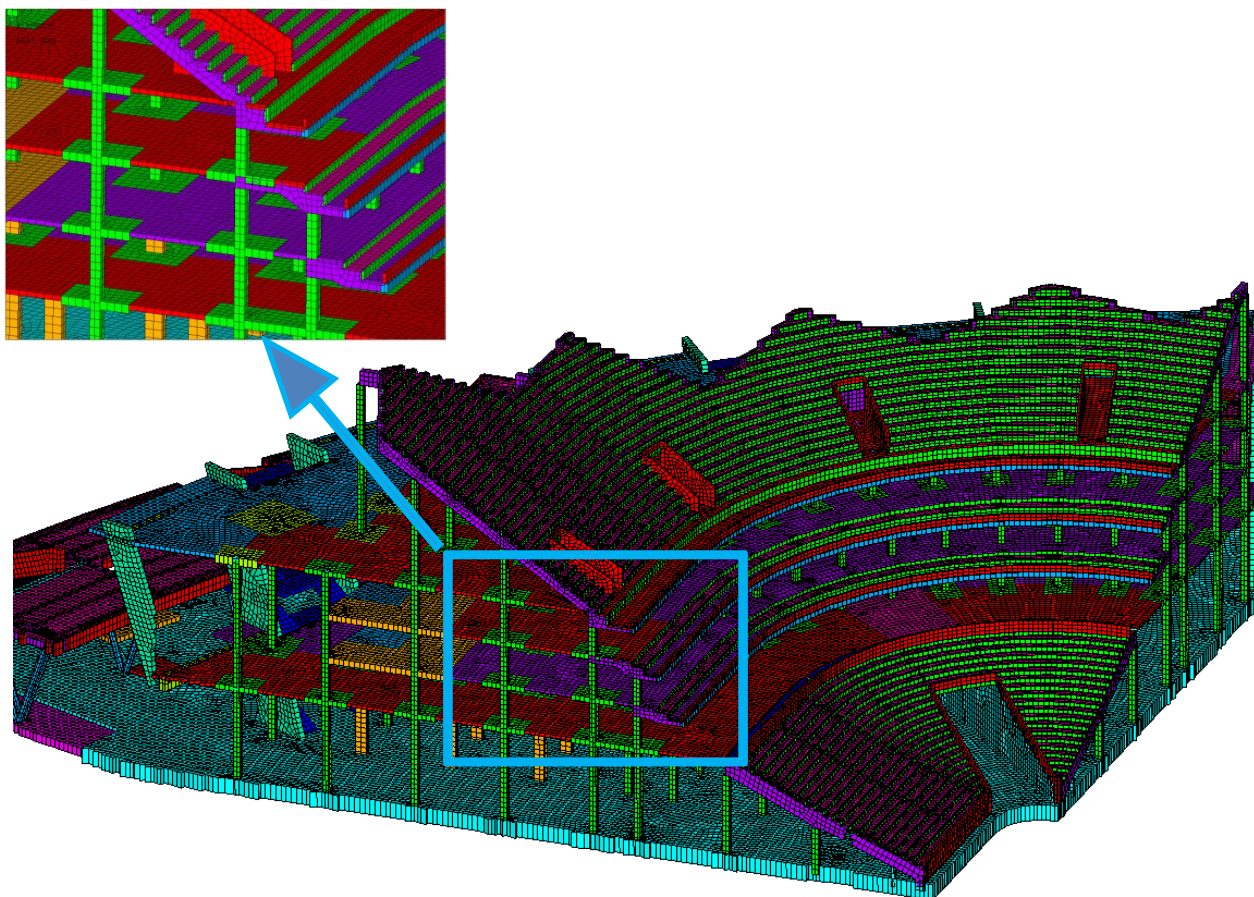


Рис.4.1.1. Фрагмент пространственной оболочечно-стержневой КЭ-модели чаши стадиона в г. Самара. Цветом показаны элементы с различными сечениями (ПК ANSYS Mechanical).

4.2. Сравнительный анализ НДС и динамических характеристик полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем «металлические конструкции покрытия» и «основание – железобетонные конструкции трибун».

Исследования НДС, прочности, устойчивости и динамики пространственной системы несущих железобетонных и металлических конструкций футбольного стадиона в рамках сепаратных моделей позволяет значительно снизить вычислительную размерность задачи, а также решить проблемы организационного характера при проектировании такого рода уникальных сооружений.

Так как разработку и расчетную оптимизацию связанных основных подсистем, таких как основание, железобетонные конструкции чаши стадиона, металлические конструкции покрытия, фасадные конструкции и т.д. ведут независимо друг от друга различные проектные организации, зачастую построить расчетную модель полной системы «основание – железобетонные конструкции чаши стадиона – металлические конструкции крыши» не представляется возможным. Препятствиями к этому служат различные факторы, от большой вычислительной размерности таких моделей до несовместимости форматов файлов расчетных моделей в различных программных комплексах и коммерческих тайн.

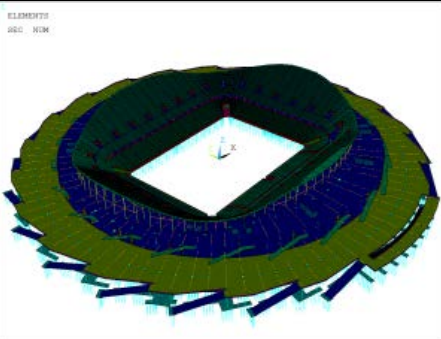
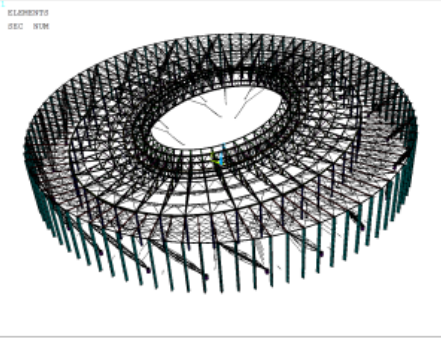
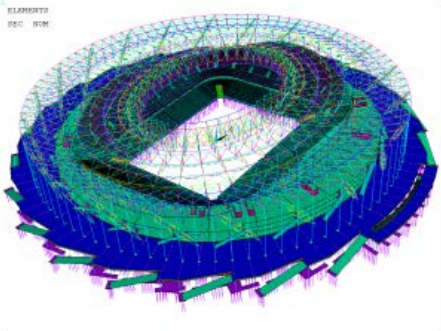
№ п/п	КЭ-модели системы/ подсистемы	Изображение	Количество узлов	Количество элементов	Типы КЭ
1	«основание – железобетонные конструкции чаши стадиона и зон фойе»		624 959	787 582	SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154 COMBIN14
2	«металлические конструкции крыши»		56 274	29 516	BEAM188 MPC184 SURF154
3	«основание – железобетонные конструкции чаши стадиона – металлические конструкции крыши»		680 127	811 522	SHELL181 BEAM188 MPC184 SURF154 COMBIN14

Рис.4.2.1. Разработанные расчетные КЭ-модели несущих конструкций стадиона в г. Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical).

Ниже приведены два апробированных подхода для обоснования возможности исследования состояния несущих конструкций стадиона в рамках подмоделей, которые были применены нашим коллективом специалистов.

4.2.1 Сравнительный анализ собственных частот и форм колебаний полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем.

Сопоставив собственные частоты и формы колебаний полной модели сооружения и подмодели конструкций покрытия можно оценить насколько велико влияние податливости опорной подсистемы «основание – железобетонные конструкции чаши» на статическое состояние, динамику и устойчивость упомянутой подсистемы «металлоконструкции покрытия».

При слабом влиянии, т.е. при отсутствии совместных форм и незначительном расхождении значений частот колебаний для родственных форм, можно сделать вывод о возможности исследования НДС в рамках сепаратных моделей.

Таким образом, оказалось возможным исследование НДС, прочности, устойчивости и динамики конструкций для всех рассмотренных стадионов. Ниже приведен вариант такого обоснования на примере стадиона в городе Нижний Новгород [10, 19].

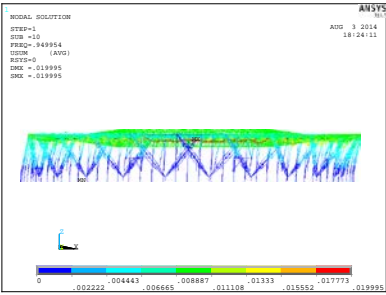
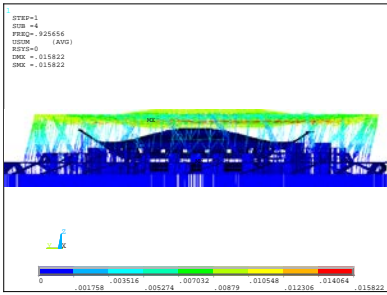
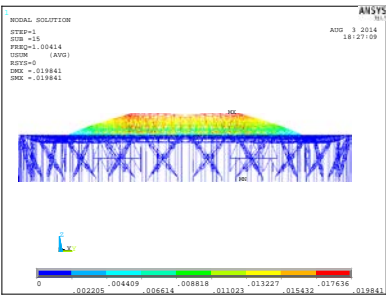
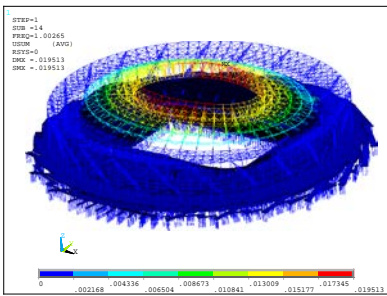
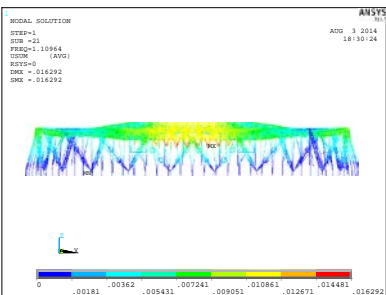
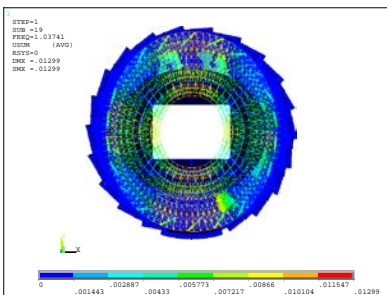
КЭ-модель покрытия (модель 2)			Общая КЭ-модель (модель 3)		
№ формы	Частота, Гц	Форма колебания	№ формы	Частота, Гц	Форма колебания
1	0.9500		2	0.9256	
2	1.00414		4	1.00263	
3	1.1096		5	1.0374	

Рис.4.2.2. Сравнительный анализ частот и форм колебаний КЭ-модели подсистемы «металлические конструкции покрытия и фасадов» (модель 2) и КЭ-модели полной системы «основание – железобетонные конструкции трибун - металлические конструкции покрытия и фасадов» (модель 3). (ПК ANSYS Mechanical).

КЭ-модель чаши (модель 1)			Общая КЭ-модель (модель 3)		
№ формы	Частота, Гц	Форма колебания	№ формы	Частота, Гц	Форма колебания
1	0.8530	<pre> MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 FREQ= 0.852958 USUM (AVG) RSTY=0 DMX = .042337 SMX = -.042337 </pre>	1	0.8607	<pre> STEP=1 SUB =2 FREQ= .860719 USUM (AVG) RSTY=0 DMX = .032795 SMX = -.032795 </pre>
2	0.9866	<pre> MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =2 FREQ= .986622 USUM (AVG) RSTY=0 DMX = .068731 SMX = -.2658-10 SMX = -.068731 </pre>	3	0.9898	<pre> STEP=1 SUB =13 FREQ= .989813 USUM (AVG) RSTY=0 DMX = .068262 SMX = -.068262 </pre>
3	1.0853	<pre> MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =3 FREQ=1.08539 USUM (AVG) RSTY=0 DMX = -.060536 SMX = .247E-10 SMX = -.060536 </pre>	6	1.0823	<pre> STEP=1 SUB =20 FREQ=1.08229 USUM (AVG) RSTY=0 DMX = .058883 SMX = -.058883 </pre>

Рис.4.2.3. Сравнительный анализ частот и форм колебаний КЭ-модели подсистемы «основание – железобетонные конструкции трибун» (модель 1) и КЭ-модели полной системы «основание – железобетонные конструкции трибун - металлические конструкции покрытия и фасадов» (модель 3). (ПК ANSYS Mechanical).

4.2.2 Применение метода динамического синтеза подконструкций.

Альтернативным подходом, который можно применить даже в том случае, когда сравнительный анализ собственных частот и форм колебаний полной модели конструкций стадиона и моделей подсистем не дает удовлетворительного ответа (возможность декомпозиции), является метод суперэлементов (МСЭ) или метод динамического синтеза подконструкций.

Ключевой процедурой метода суперэлементов является статическая конденсация – исключение внутренних степеней свободы подконструкции $\{u_i\}$ – приводящая исходную блочную систему уравнений равновесия

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_b \end{Bmatrix}$$

к редуцированной системе относительно компонент вектора граничных неизвестных $\{u_b\}$:

$$[\bar{K}]\{u_b\} = \{\bar{F}\},$$

$$\text{где} \quad [\bar{K}] = [K_{bb}] - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}[K_{ib}]; \quad \{\bar{F}\} = \{F_b\} - [K_{bi}][K_{ii}]^{-1}\{F_i\}.$$

Суперэлементный алгоритм распространяется также на решение системы линейных уравнений на каждом шаге неявной схемы прямого интегрирования уравнений движения и на каждой итерации при расчете собственных колебаний.

Альтернативный подход состоит в построении специальных суперэлементных алгоритмов, основанных на непосредственной конденсации уравнений движения и идеологически близких методу динамического синтеза подконструкций.

Методы динамического синтеза подконструкций можно классифицировать по способу выбора базисных векторов метода Релея-Ритца для подконструкций и по способу их стыковки.

Чаще всего в качестве базиса для подконструкций используются ее формы колебаний при определенных граничных условиях: для закрепленной границы, для свободной границы, для частично закрепленной границы подконструкции.

Из трех рассмотренных вариантов метода наиболее предпочтительным, с вычислительной и реализационной точек зрения, является первый, использующий формы колебаний основной системы метода перемещений. При этом, для упрощения стыковки подконструкций и для правильного учета их жестких смещений и перемещений граничных точек базис из форм колебаний целесообразно дополнить набором статических функций формы суперэлементов (СЭ), каждая из которых представляет собой вектор упругих перемещений узлов подконструкции, вызванных единичным смещением по направлению соответствующей фиктивной связи для основной системы метода перемещений.

Наиболее популярен реализованный в «тяжелых» универсальных программных комплексах (ANSYS, ABAQUS, СТАДИО, ...) подход Крейга-Бемп-тона, сводящийся к построению редуцированных матриц жесткости и масс:

$$[K^e] = [\Phi]^T \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} [\Phi] = \begin{bmatrix} K_{CC}^e & 0 \\ 0 & K_{NN}^e \end{bmatrix}; \quad [K^e] = [\Phi]^T \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} [\Phi] = \begin{bmatrix} K_{CC}^e & 0 \\ 0 & K_{NN}^e \end{bmatrix},$$

$$\text{где} \quad [\Phi] = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \Phi_{ic} & \Phi_{in} \end{bmatrix};$$

Φ_{ic} – перемещения внутренних степеней свободы СЭ для заданных единичных перемещений граничных (стыковочных) узлов; Φ_{in} – перемещения внутренних степеней свободы, соответствующие удерживаемым собственным формам колебаний при ограничении степеней свободы (заделке) граничных узлов; $[K_{NN}^e]$ и $[M_{NN}^e]$ – диагональные модальные матрицы жесткости и масс; $[K_{CC}^e] = [\bar{K}]$; $[M_{CC}^e] = [\bar{M}]$; $[M_{NC}^e] = [M_{CN}^e]^T$ – заполненные матрицы.

Таким образом, для учета влияния отдельных подсистем на статическое и динамическое поведение исследуемой конструкции достаточно включить в расчет редуцированные матрицы жесткости и масс, сформированные для этих подсистем. Эти редуцированные матрицы генерируются программными комплексами в универсальном формате, поэтому отсутствует проблема несовместимости форматов. Так же, передавая данные о своей подсистеме в виде таких матриц, конструкторская организация не разглашает никакой лишней информации, сохраняя и коммерческую тайну.

4.3. Моделированием неоднородного грунтового основания и свайного поля.

На одном из первых этапов приходится сталкиваться с ещё одной важной особенностью – моделированием неоднородного грунтового основания и свайного поля, содержащего несколько тысяч свай; Сваи применены в конструкциях фундаментов стадионов в Нижнем Новгороде (9945шт) [10, 19], Ростове-на-Дону (11091шт) [12], Екатеринбург (318шт) [15, 20], а также в фундаментах пешеходной эстакады стадиона в Волгограде [11, 21]. Процесс моделирования нескольких тысяч свай требует применения макросов – написанных на встроенном в программный комплекс языке программирования скриптов или подпрограмм, что позволяет эффективно, автоматизировано и в короткие сроки задавать жесткости и обрабатывать выходные данные для такого массива свай.

Значения жёсткостей свай в продольном (вертикальном) и поперечных направлениях, как правило, принимались по данным НИИОСП, после нескольких итераций взаимодействия по следующей схеме: задания жесткости свай на первой итерации – определения усилий в сваях – передача их в НИИОСП, пересчет жесткостных характеристик – приложение их к расчетной модели для проведения следующей итерации.

Для задания вертикальной и горизонтальной жесткости свай к соответствующим узлам фундамента присоединялись «пружинки», конечные элементы типа COMBIN14 (ПК ANSYS) (в направлении осей X, Y и Z) с заданными жесткостями.

В выполненных работах были смоделированы свайные поля, содержащие порядка 10000 свай, для чего широко применялись макросы, написанные на языке APDL – встроенном в программный комплекс ANSYS Mechanical.

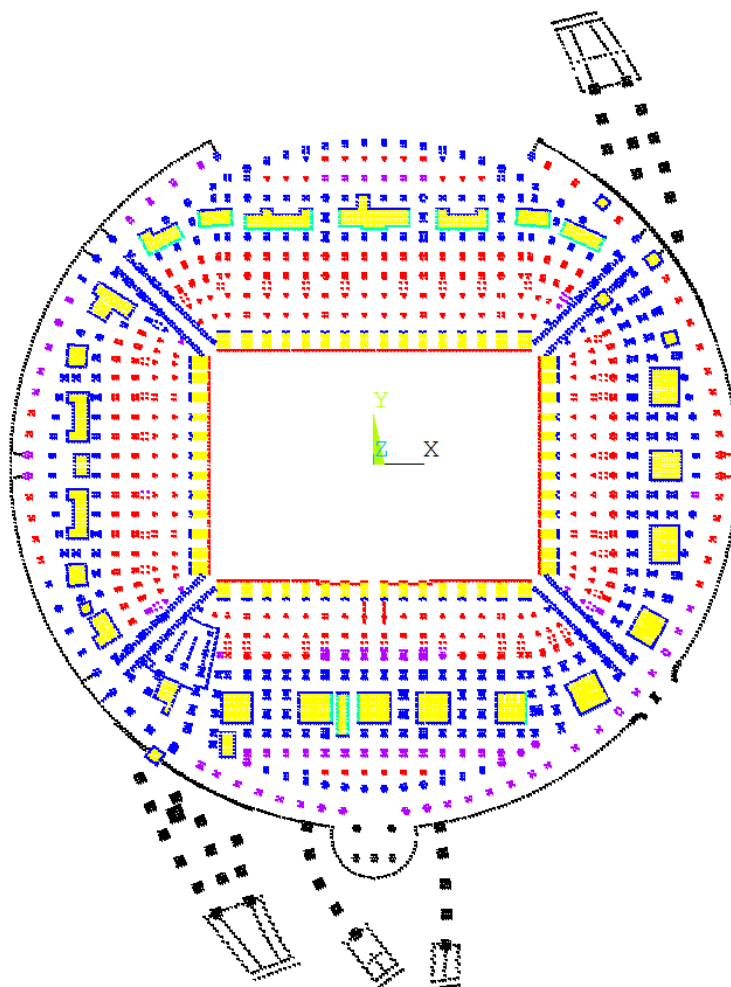


Рис.4.3.1. Общий вид свайного поля стадиона (11 091 свай). Стадион в г.Ростов-на-Дону. Фрагмент разработанной КЭ-модели в ПК ANSYS Mechanical.

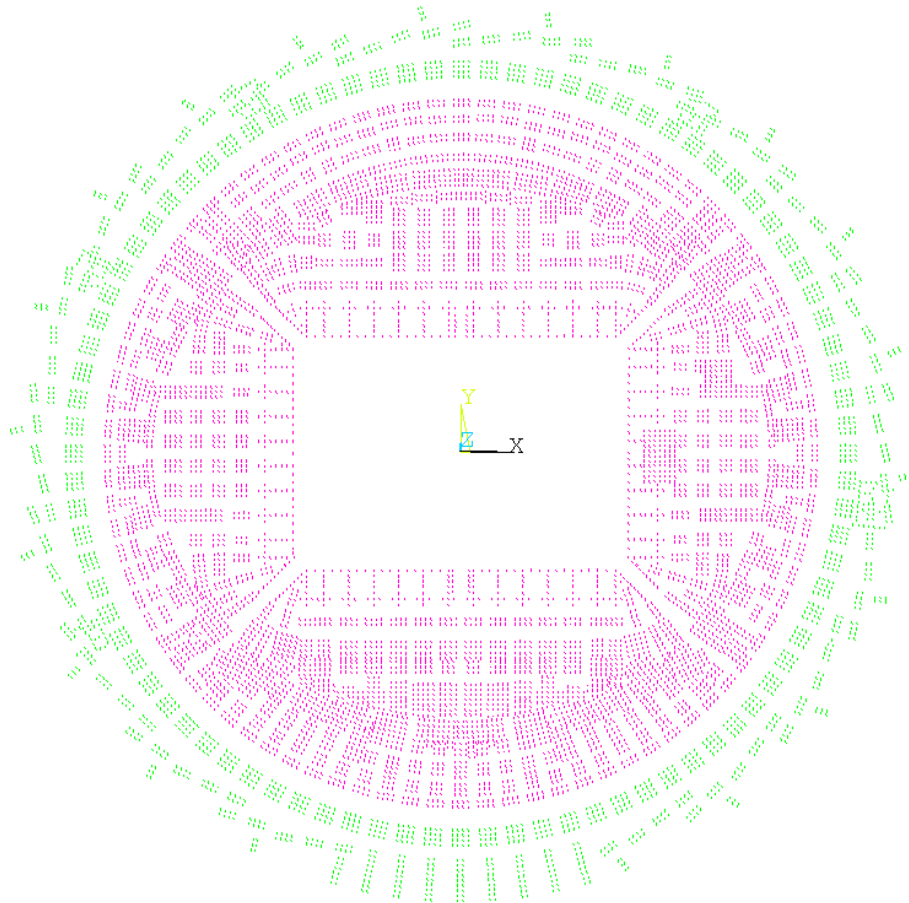


Рис.4.3.2. Общий вид свайного поля стадиона (9 945 свай). Стадион в г. Нижний Новгород. Фрагмент разработанной КЭ-модели в ПК ANSYS Mechanical.

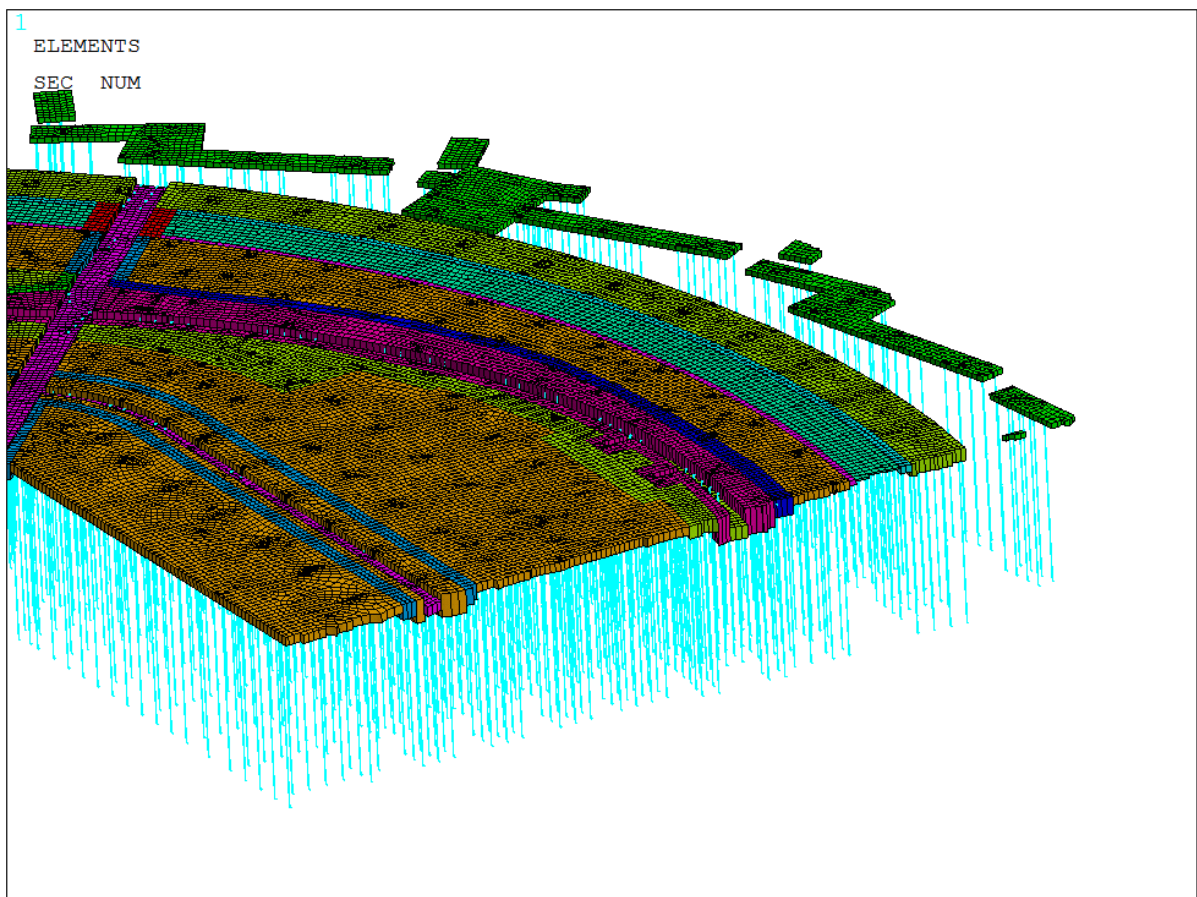


Рис.4.3.3. Фрагмент плитного ростверка со сваями. КЭ-модель стадиона в г. Нижний Новгород. (ПК ANSYS Mechanical).

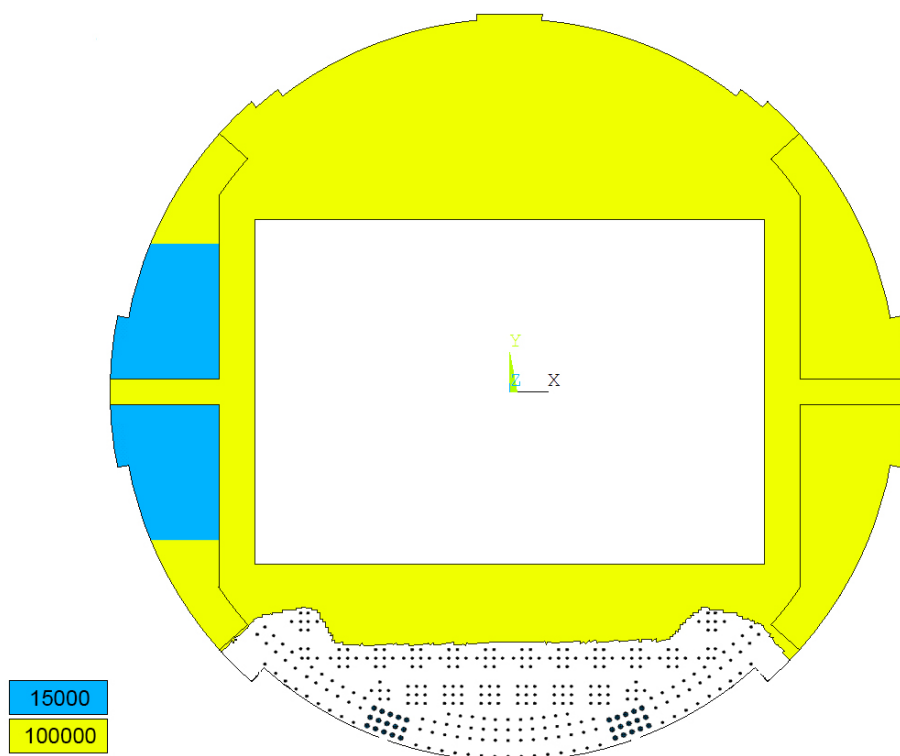


Рис.4.3.4. Общий вид свайного поля стадиона (318 свай) и схема распределения коэффициентов постели ($\text{кН}/\text{м}^3$), стадион в г. Екатеринбург. Фрагмент разработанной КЭ-модели в ПК ANSYS Mechanical.

ELEMENTS
SEC NUM

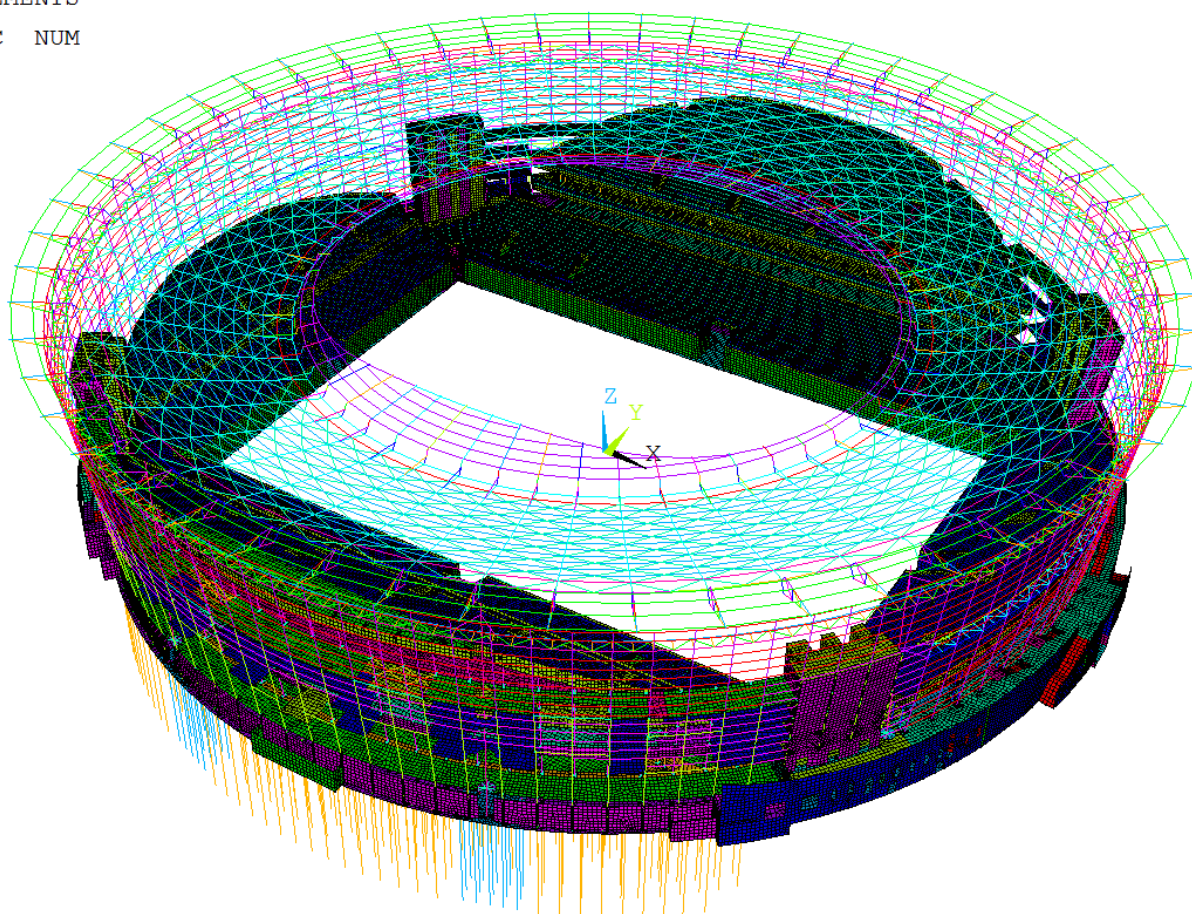


Рис.4.3.5. КЭ-модель стадиона в г.Екатеринбург. На переднем плане виден фрагмент свайного поля. (ПК ANSYS Mechanical).

4.4 Многоитерационный процесс дополнения и корректировки положения и характеристик несущих конструкций стадионов на основании результатов статических и динамических расчетов, в том числе, для удовлетворения критериям зыбкости конструкции «гребенки» трибун.

Динамические воздействия, обусловленные согласованными движениями большого числа людей, находящихся на трибунах спортивных сооружений, вызывают колебания конструкций, которые, в свою очередь, могут снижать комфортность пребывания людей в таких сооружениях.

Расчет на динамическую комфортность (или другими словами на «зыбкость») неразрывно связан с многоитерационным процессом дополнения и корректировки положения несущих конструкций стадиона на основании результатов статических и динамических расчетов для удовлетворения критериям динамической комфортности (иными словами зыбкости) конструкции «гребенки» трибун.

При проектировании конструкций трибун спортивных сооружений необходимо исключить возможность их резонансного возбуждения, от синхронного движения людей. Для этого предельные прогибы конструкций трибун должны быть определены исходя из физиологических требований («зыбкости») по п.10.10 СНиП 2.01.07-85*.

Кроме того, частоты собственных колебаний конструкций трибун должны быть в вертикальном направлении больше 5 Гц, а в горизонтальном направлении – больше 3 Гц (данные критерии могут незначительно отличаться и определяются в СТУ). При определении собственных частот учитывается только масса трибун, без учета полезной нагрузки. Массы, относящиеся к зданию (перекрытия, покрытия, колонны и т.д.) также не учитываются.

При проведении расчетов на «зыбкость» трибун стадионов в Нижнем Новгороде [10, 19] и Волгограде [11, 21] была выявлена недостаточная жесткость несущих конструкций. Критерии по низшим собственным частотам трибун не были удовлетворены, что потребовало оперативного внесения изменений в проект.

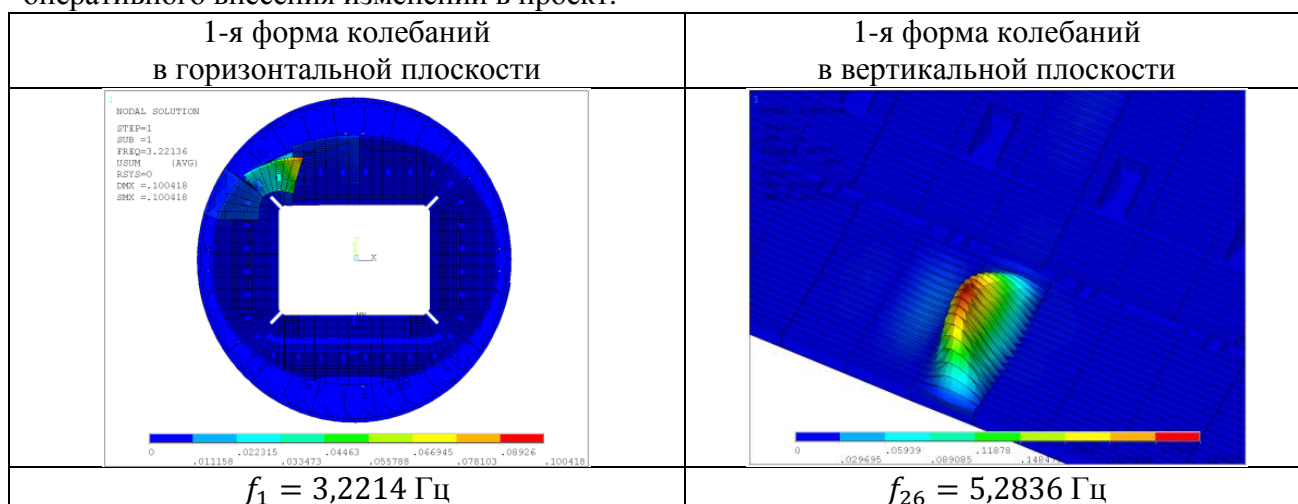


Рис.4.4.1. Низшие собственные частоты и формы колебания трибун стадиона в г. Волгоград.

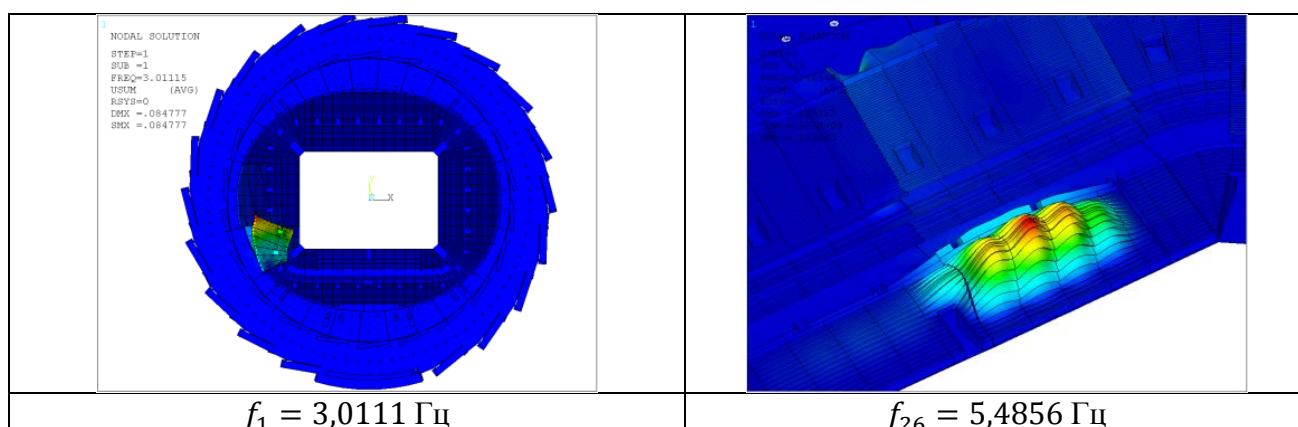


Рис.4.4.2. Низшие собственные частоты и формы колебания трибун стадиона в г. Н. Новгород.

Общая жесткость конструкций стадионов повышалась путем добавления диафрагм жесткости между соседними колоннами, что потребовало дополнительных согласований с архитекторами, многоитерационных расчетов и корректировок положения несущих конструкций стадионов на основании результатов статических и динамических расчетов. В результате проведенных расчетных исследований физиологические требования по «зыбкости» были удовлетворены.

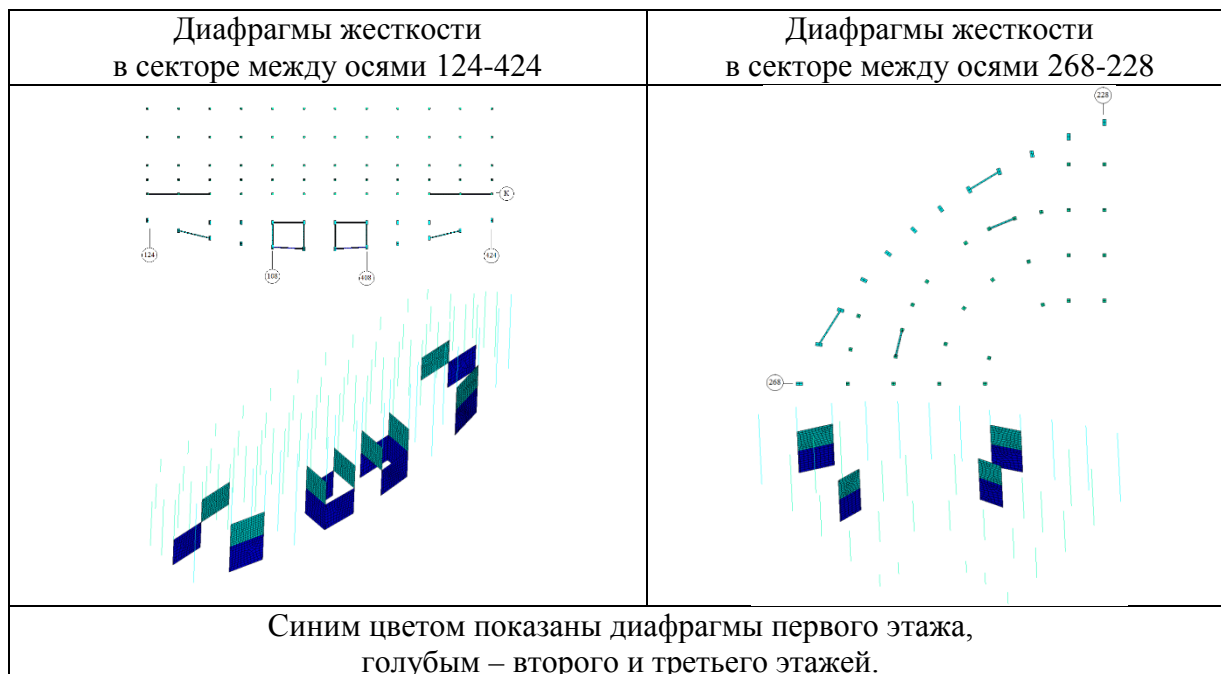


Рис.4.4.3. Общий вид встраиваемых диафрагм жесткости на стадионе в г. Волгоград. Фрагмент разработанной КЭ-модели в ПК ANSYS Mechanical.

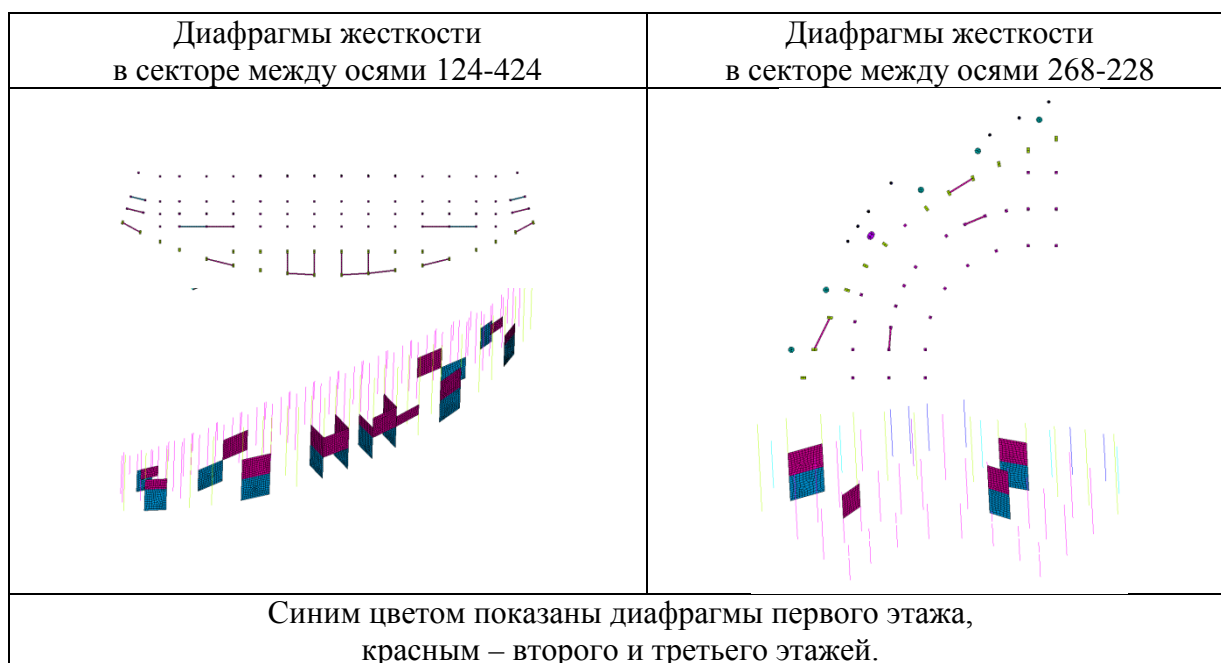


Рис.4.4.4. Общий вид встраиваемых диафрагм жесткости на стадионе в г. Нижний Новгород. Фрагмент разработанной КЭ-модели в ПК ANSYS Mechanical.

4.5 Расчетные исследования трехмерного НДС и прочности конструктивных узлов металлического покрытия с учетом эффектов физической нелинейности.

Для наиболее сложных и ответственных узлов металлических конструкций покрытий стадионов разрабатывались и анализировались в программном комплексе ANSYS подробные КЭ-модели, состоящие из объемных (см. соответствующий параграф настоящей главы) и/или оболочечных элементов. В центральных зонах конструктивных узлов КЭ-сетка сгущалась. В зонах стыковки объемных/оболочечных и балочных элементов задавались специальные условия, для создания жестких связей между узлами. Зоны болтовых соединений принимались без учета контакта и сдвига, болты явно не моделировались.

Подробные модели узлов встраивались в общие модели покрытия. Разработанные модели верифицировались путем сравнения максимальных перемещений до и после включения узла в общую модель от расчетной нагрузки.

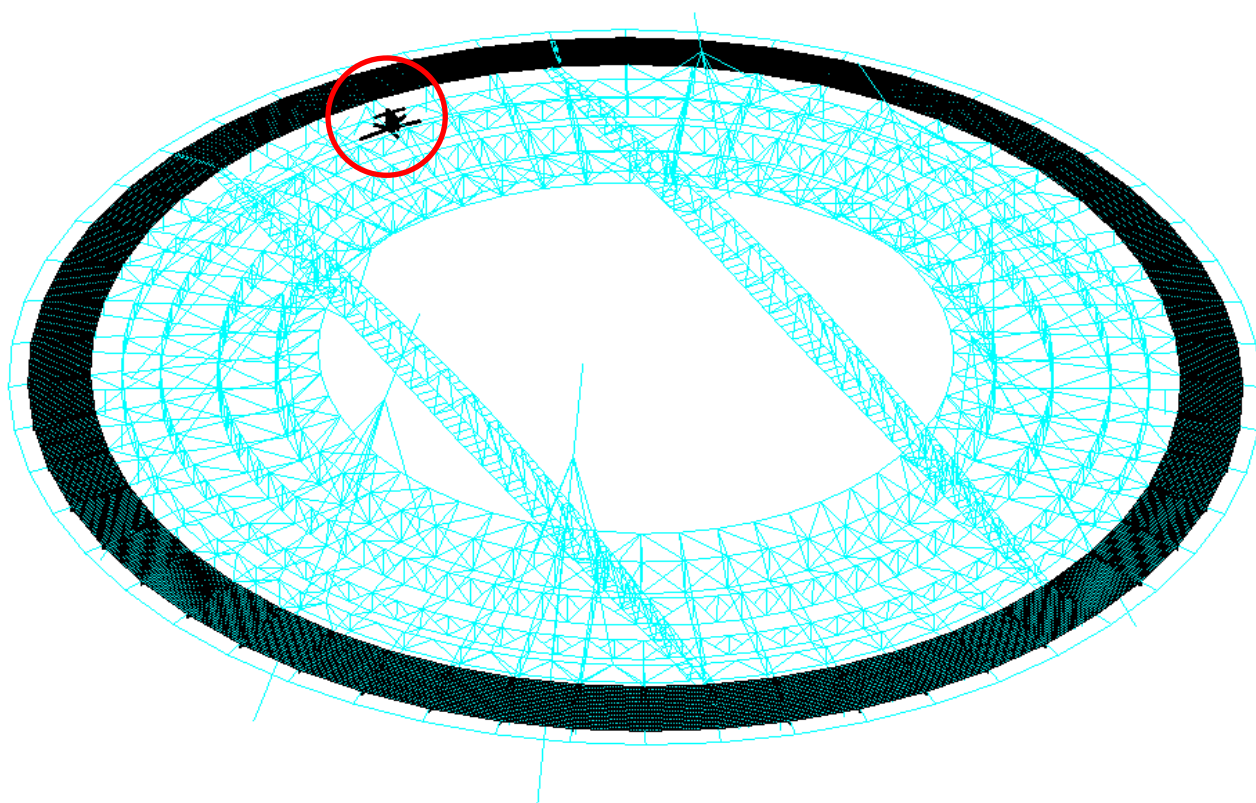


Рис.4.5.1. Разработанная КЭ-модель покрытия несущей конструкции с трехмерным узлом. (ПК ANSYS Mechanical).

Расчет проводился на первой итерации в линейно-упругой обстановке. В случае превышения допустимых напряжений проводилась вторая итерация расчета с учетом физической нелинейности.

Для расчетов с учетом физической нелинейности (возможного пластического деформирования наиболее напряженных зон) заводились диаграммы Прандтля с $\sigma_T = 375$ МПа и $\sigma_T = 390$ МПа, в зависимости от узла, с использованием модели («опции») KINH – Multilinear Kinematic Hardening. Мультилинейное кинематическое упрочнение (Multilinear Kinematic Hardening, KINH и MKIN) использует модель Бесселинга (Besseling), также называемую подуровневой или накладывающейся, в которой учитывается эффект Баушингера.

В результате проведенных расчетных исследований с учетом физической нелинейности была обоснована прочность узлов металлических конструкций покрытия и фасадов футбольных стадионов.

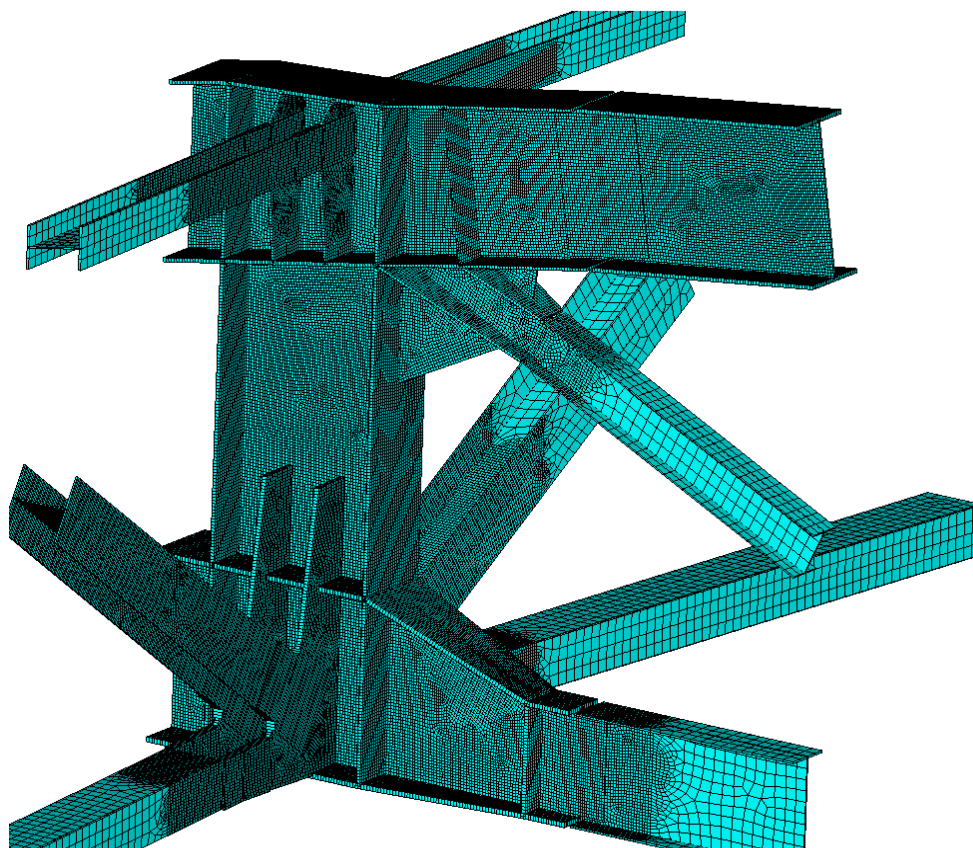


Рис.4.5.2. Вид оболочечной КЭ-модели узла в составе общей модели Узлов – 189 569, оболочечных КЭ – 637 199. (ПК ANSYS Mechanical)

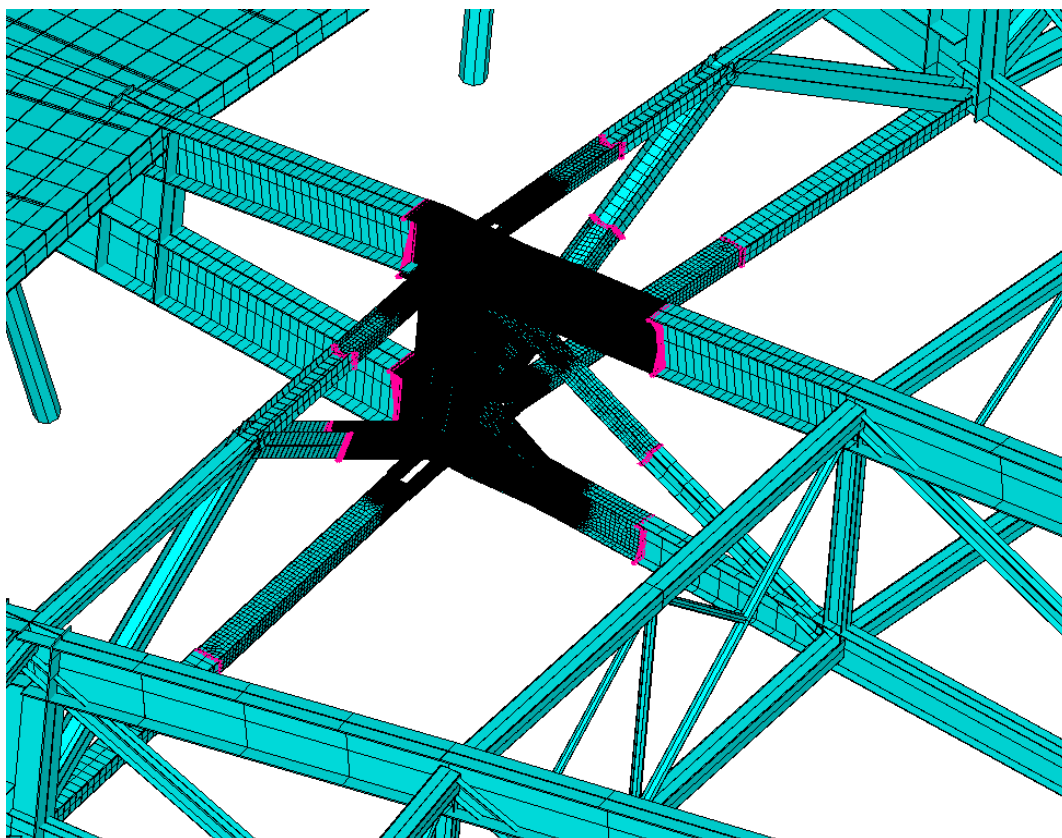


Рис.4.5.3. Стыковка оболочечной КЭ-модели узла со стержневой КЭ-моделью (3D-визуализация). Жёсткие вставки показаны ярко-розовым. (ПК ANSYS Mechanical)

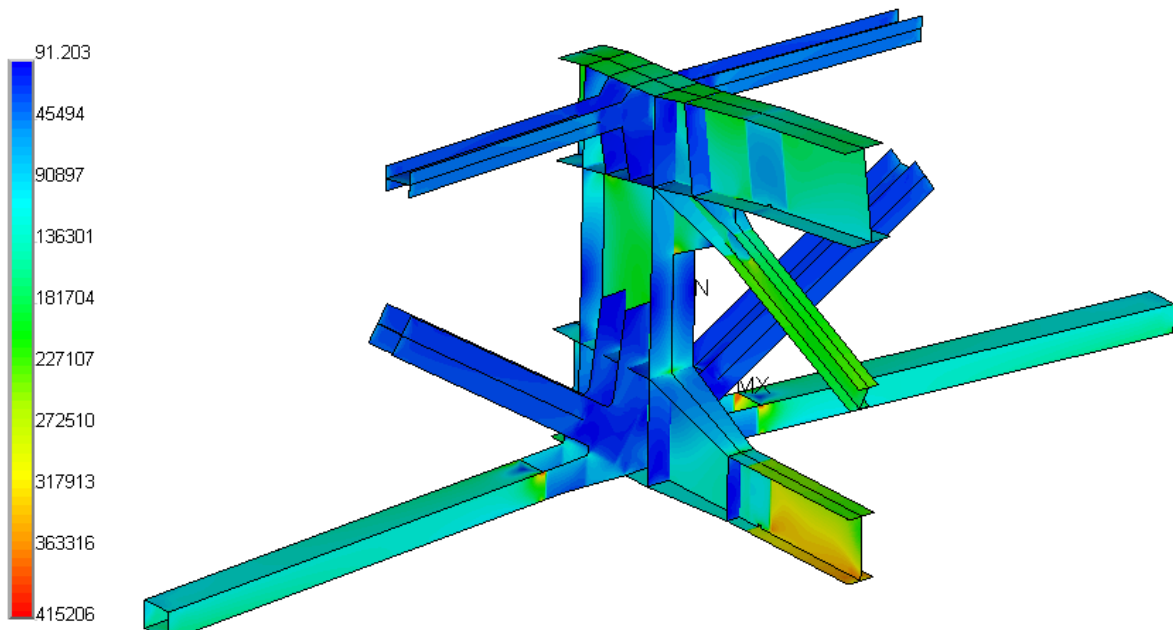


Рис.4.5.4. Эквивалентные напряжения (по Мизесу) в узле (на срединных поверхностях), кПа.
(ПК ANSYS Mechanical)

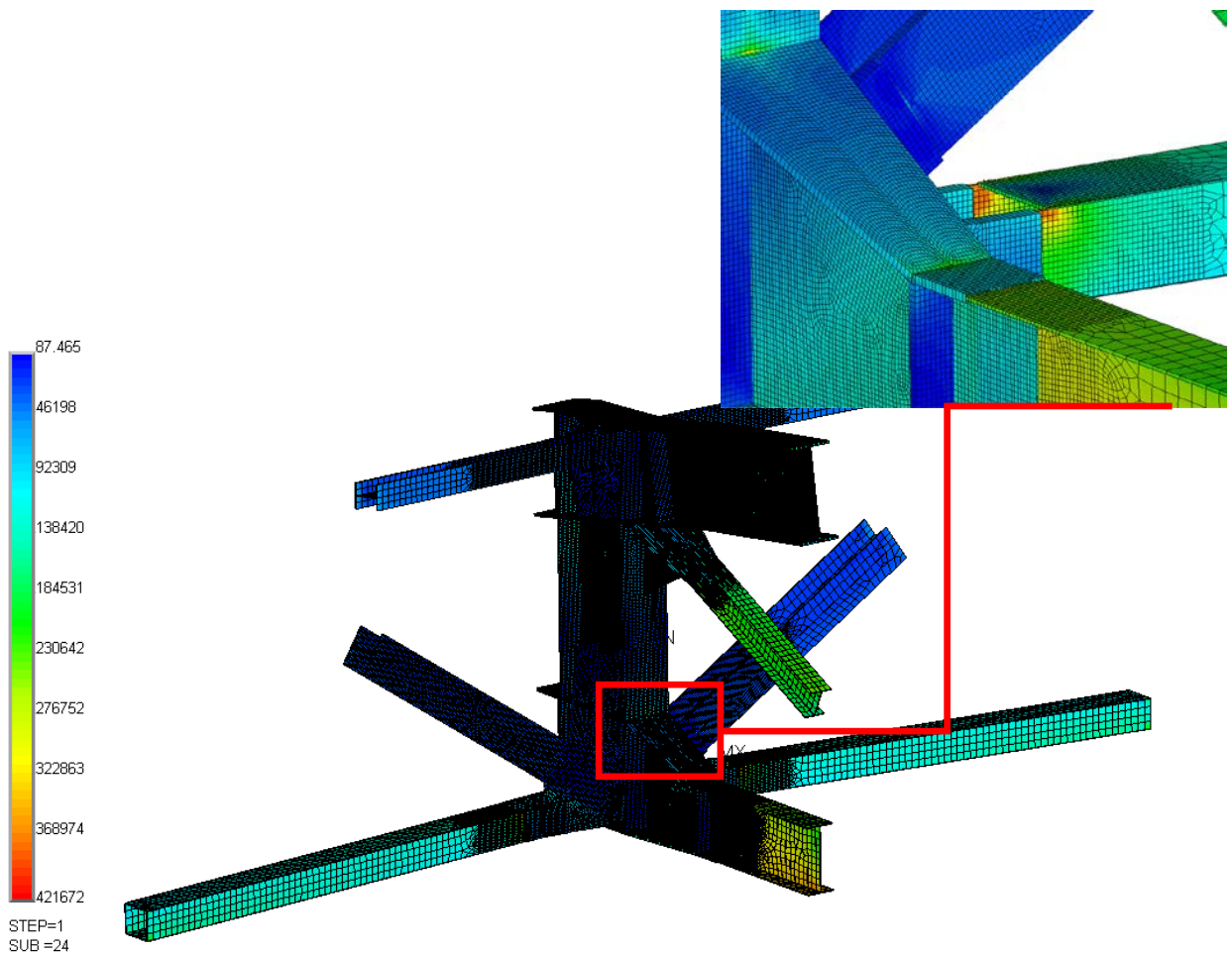


Рис.4.5.5. Эквивалентные напряжения (по Мизесу) в узле (3D-визуализация), кПа.
 $\sigma_{\max} = 422$ МПа. (ПК ANSYS Mechanical)

4.6 Расчет на устойчивость металлических конструкций покрытий с учетом физической и геометрической нелинейностей и начальных несовершенств.

Расчеты на устойчивость в геометрически и физически нелинейной постановках проводились для конструкций покрытий стадионов. В каждом случае рассматривались несколько наиболее опасных сочетаний нагрузок (из общего количества порядка сотни сочетаний), для которых и проводился расчет. Диаграммы деформирования задавались на основе расчетных значений пределов текучести и временного сопротивления материалов.

По результатам расчетов были выявлены формы потери устойчивости элементов металлических конструкций покрытий при коэффициентах запаса больше 1.

Выполненными расчетными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние металлических конструкций покрытий удовлетворяет нормативным критериям устойчивости.

Ниже кратко представлены такого расчета на примере покрытия стадиона в г. Нижний Новгород [10, 19].

Состав расчетных комбинаций загружений представлен в таблице ниже:

Комбинация	Собственный вес	Постоянные	Технологические	Гололедные	Снег по карте 1	Снег по карте 2	Снег по карте 3	Снег по карте 4
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			
4	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0		
5	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0	
6	1.0	1.0	1.0	1.0				1.0

Первые десять коэффициентов по линейной устойчивости отображены в таблице ниже. Минимальный коэффициент получен для третьей комбинации нагрузок и составил 1.047 или 104.7% от полной нагрузки.

Коэффициенты по устойчивости по первым десяти формам устойчивости

Номер формы	№ Комбинации загружений			
	3	4	5	6
1	1.0470	1.1378	1.0916	1.1034
2	1.0470	1.1378	1.0924	1.1035
3	1.0477	1.1494	1.1001	1.1303
4	1.0477	1.1494	1.1010	1.1538
5	1.0525	1.1630	1.1055	1.1599
6	1.0525	1.1630	1.1062	1.1601
7	1.0532	1.1753	1.1220	1.1611
8	1.0532	1.1753	1.1230	1.1630
9	1.0659	1.1778	1.1350	1.1656
10	1.0659	1.1778	1.1375	1.1669

Основная первая форма проявляется в виде смещения ячейки «колонна—ферма над фойе — балка над трибунами» единым блоком на минимальном коэффициенте 1.047 или 104.7% от полной расчетной нагрузки.

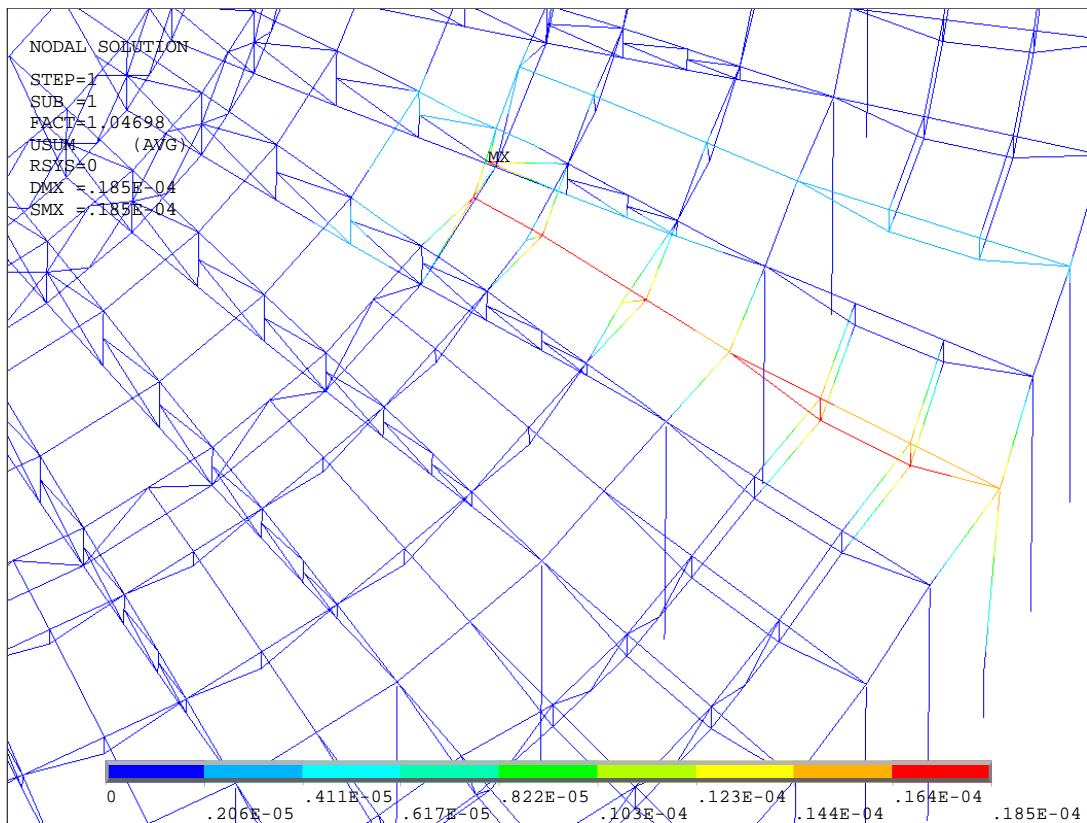


Рис.4.6.1. 1-я форма потери устойчивости (Комбинация нагрузок 3, $K=1.0469$).
 Стадион в г.Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical).

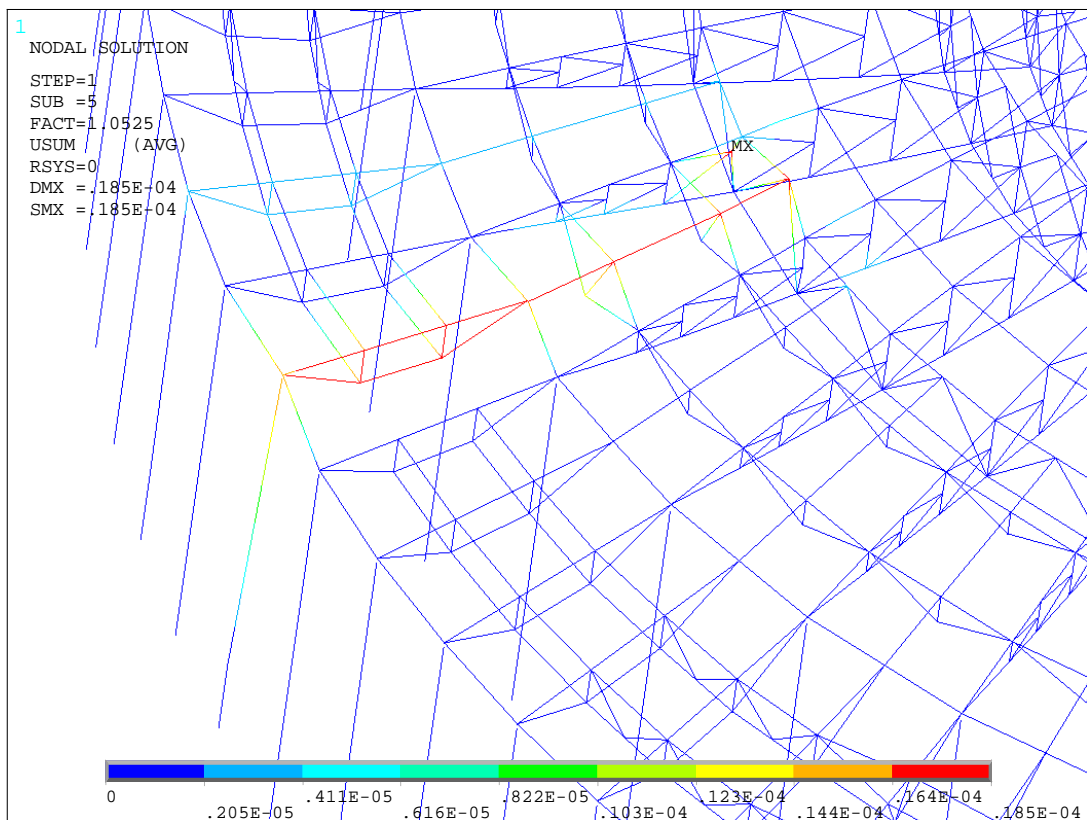


Рис.4.6.2. 5-я форма потери устойчивости (Комбинация 3, $K=1.0525$).
 Стадион в г.Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical).

При расчете конструкций покрытия *в нелинейной постановке* с учетом физической и геометрической нелинейности потеря устойчивости элементов ферм происходит на значении коэффициента по нагрузке 1.04 для полных расчетных нагрузок.

Несовершенства учитывались в виде отклонения элемента по синусоиде на величину:

$\Delta = L / 750 + r / 20$, где L — пролет элемента, r — радиус инерции сечения.

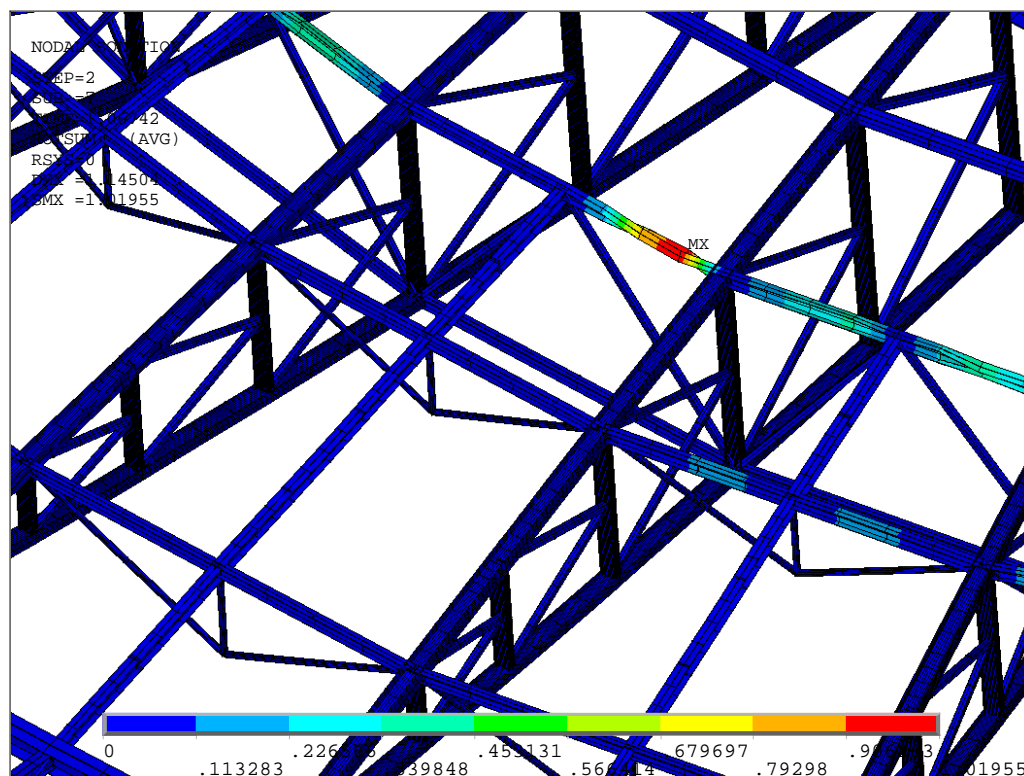


Рис.4.6.3. Геометрически нелинейная задача. Форма потери устойчивости, суммарный поворот в радианах (Комбинация нагрузок 3, $K=1.067$). Стадион в г.Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical).

*KS_VP

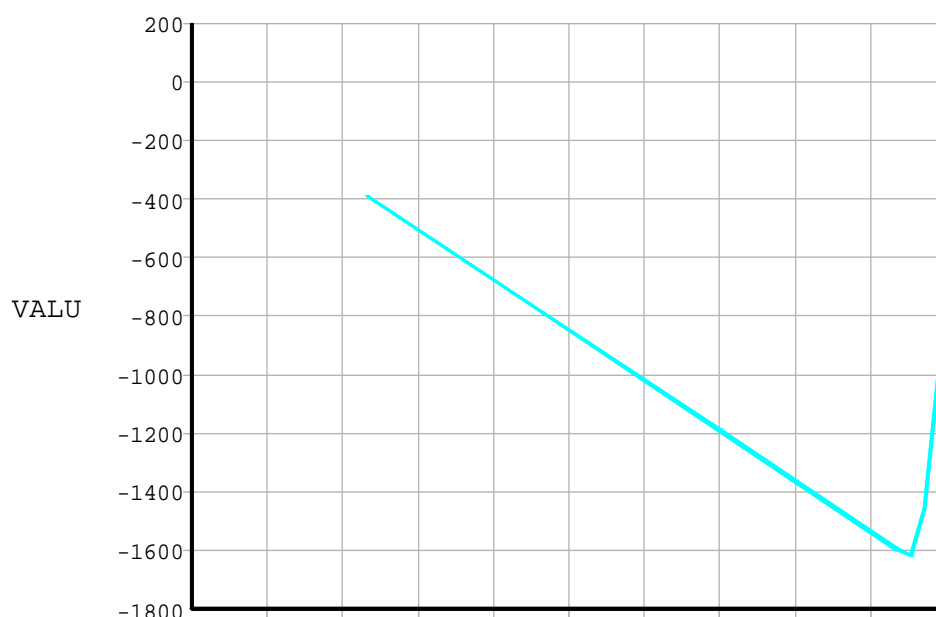


Рис.4.6.4. Продольная сила в верхнем поясе фермы при потере устойчивости (Комбинация нагрузок 3, коэффициент потери устойчивости 1.04), кН. Стадион в г.Нижний Новгород (ПК ANSYS Mechanical).

4.7 Геометрически нелинейное моделирование предварительно напряженных вантовых элементов в составе конструкций покрытия, в том числе, при расчете на прогрессирующее обрушение.

Для несущих конструкций покрытий и фасадов стадионов были получены основные параметры НДС и динамики, прочность конструкций оценивалась на основании нелинейных (с учетом геометрической нелинейности) статических расчетов для ряда сочетаний нагрузок, устойчивость – на основании нелинейных расчетов с учетом больших перемещений и деформаций, а также пластичности материала.

При расчетах конструкций на прогрессирующее обрушение рассматриваются возможные сценарии локального разрушения указанные в СТУ, например, для покрытия стадиона в Волгограде [11, 21]:

1. *отказ одного из канатов в пакете для нижнего несущего кольца (ННК);*
2. *отказ одного из поясов радиальных вантовых ферм;*
3. *отказ одного из канатов шпренгеля стропильных балок над фойе стадиона;*
4. *отказ одного из несущих элементов фасада, кроме опорных.*

В процессе выключения элементов по определенным сценариям происходит резкое возрастание перемещений, скоростей деформирования и кинетической энергии по схеме. В дальнейшем за счет достаточной жесткости конструкций происходит стабилизация с перераспределением усилий и падением кинетической энергии.

Решение задачи производилось в геометрически и физически нелинейных постановках с применением интегрирования уравнений движения во времени методом Ньюмарка по этапам:

- от 0 до 7 секунд производилось квазистатическое нагружение схемы по комбинации нагрузок с равномерным снегом (снего по вар. 1) для конструкций покрытия с повышенным демпфированием;
- от 7 до 10 секунд проводится расчет покрытия при повышенном демпфировании для анализа поведения системы после загрузки нормативной нагрузкой;
- от 10 до 11 секунд схема переводится в рабочее состояние, демпфирование снижается до 2%;
- в момент времени 11 секунд производится удаление элемента с последующим расчетом схемы в течение 40 секунд.

Удаление элементов в расчете производилось путем снижения их жесткости в 10 000 раз. Расчет выполнялся на нормативные длительные составляющие комбинации 2 (сочетание с равномерным снегом). Демпфирование для металлоконструкций принималось на уровне 2% от критического.

В результате выполненных расчетных исследований установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) металлические конструкции покрытия устойчивы к прогрессирующему обрушению.

Ниже представлены схемы сценариев потенциального разрушения и графические результаты расчетов для 2-го сценария локального разрушения покрытия стадиона в Волгограде.

- Локализация удаляемого элемента;
- графики изменения напряжений в нижнем и верхнем поясах вантовой фермы с выключаемым элементом, кПа;
- график перемещения узлов КЭ-сетки в зонах “вышедших из строя” элементов
- график изменения кинетической энергии (для подтверждения стабилизации перемещений конструкции);

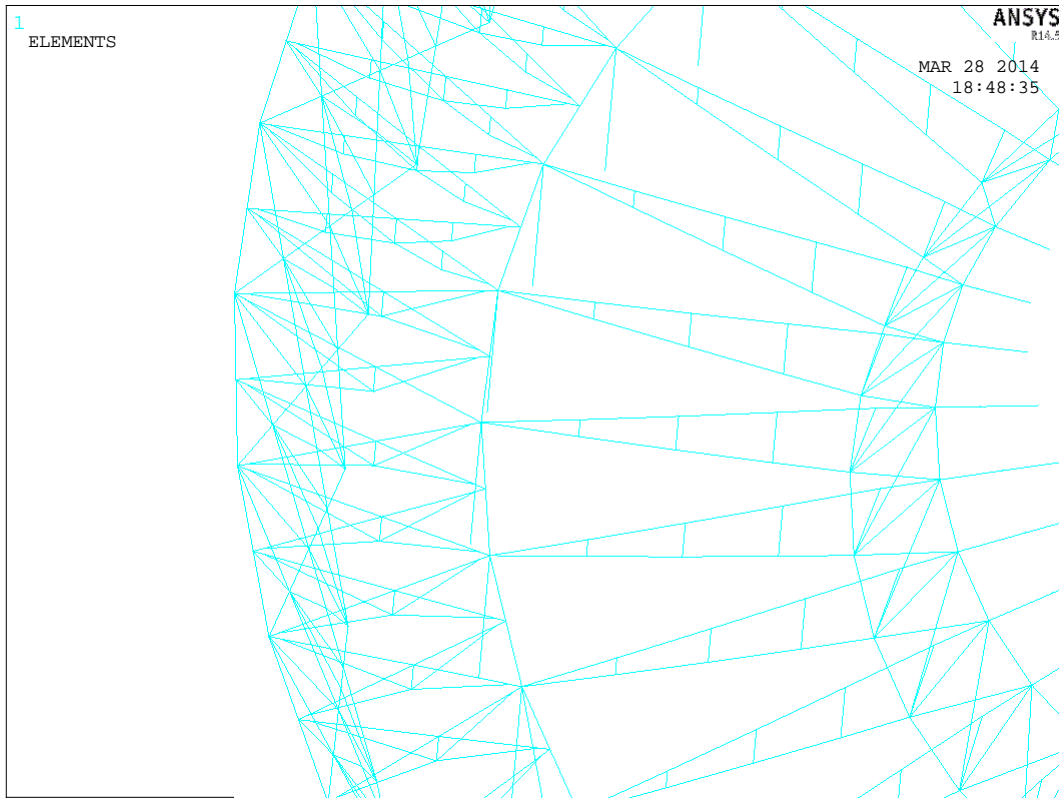


Рис.4.7.1. Сценарий 3. Зона инициирующего локального разрушения Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

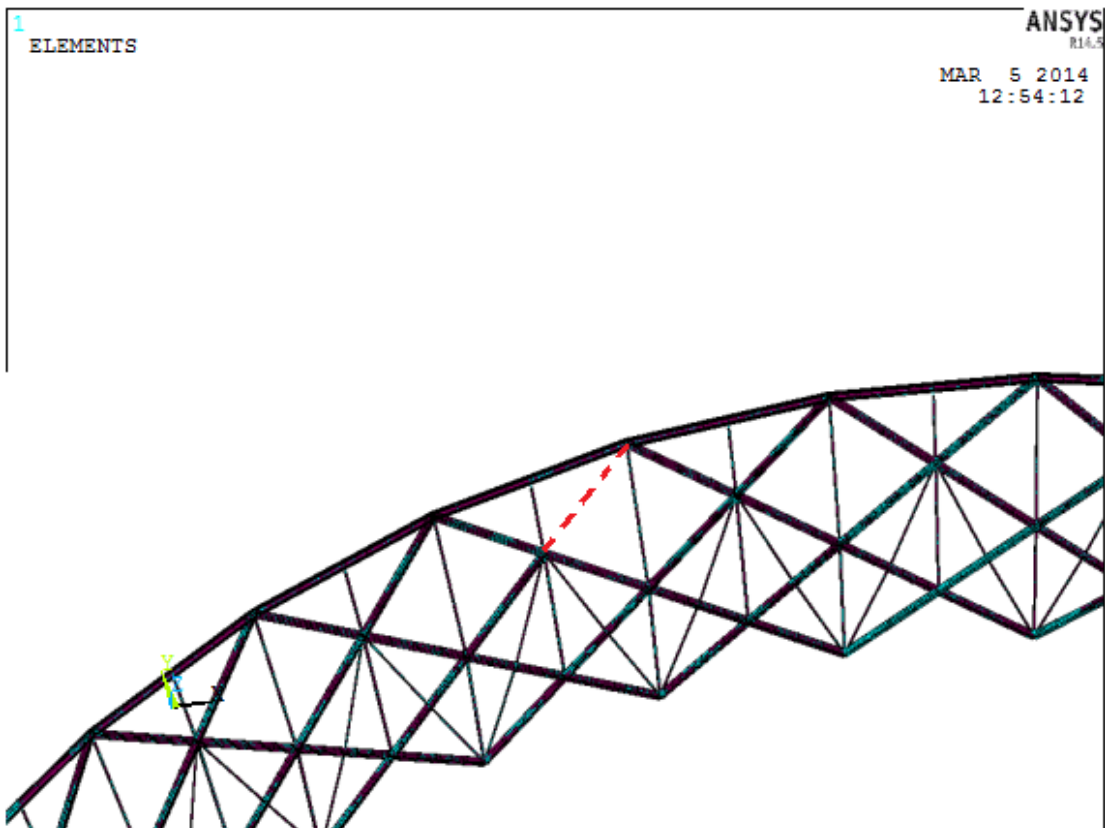


Рис.4.7.2. Сценарий 4. Локализация зоны инициирующего локального разрушения Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

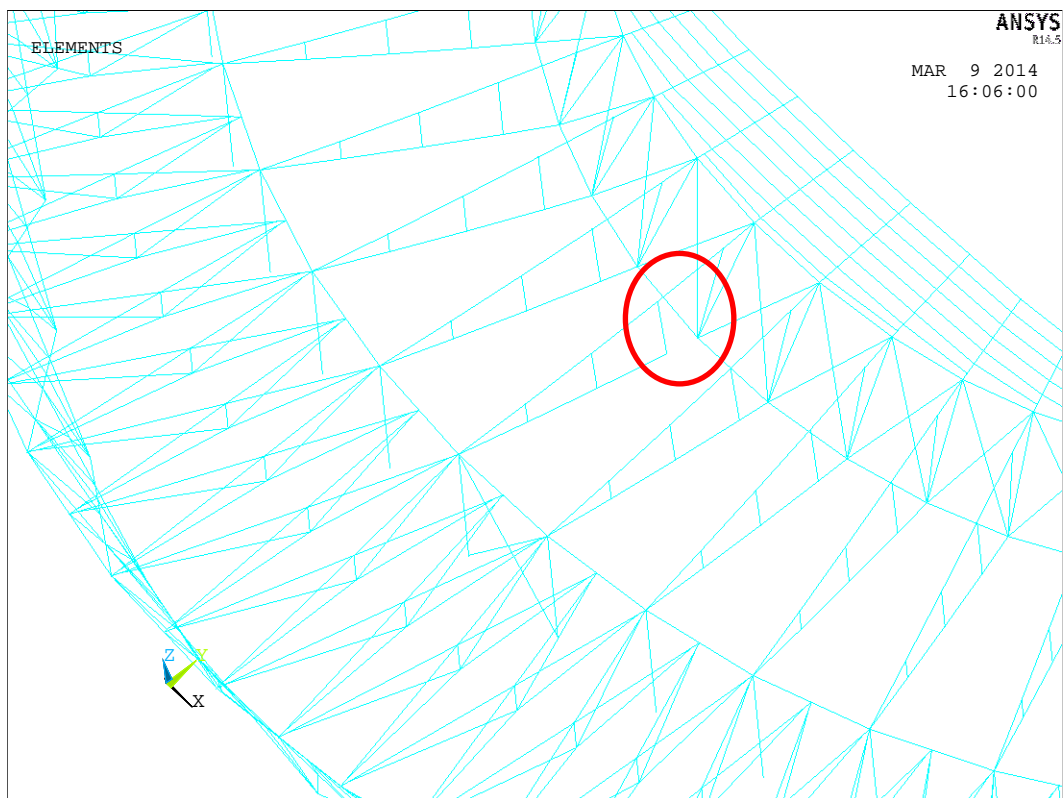


Рис.4.7.3. Сценарий 2. Локализация удаляемого элемента Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

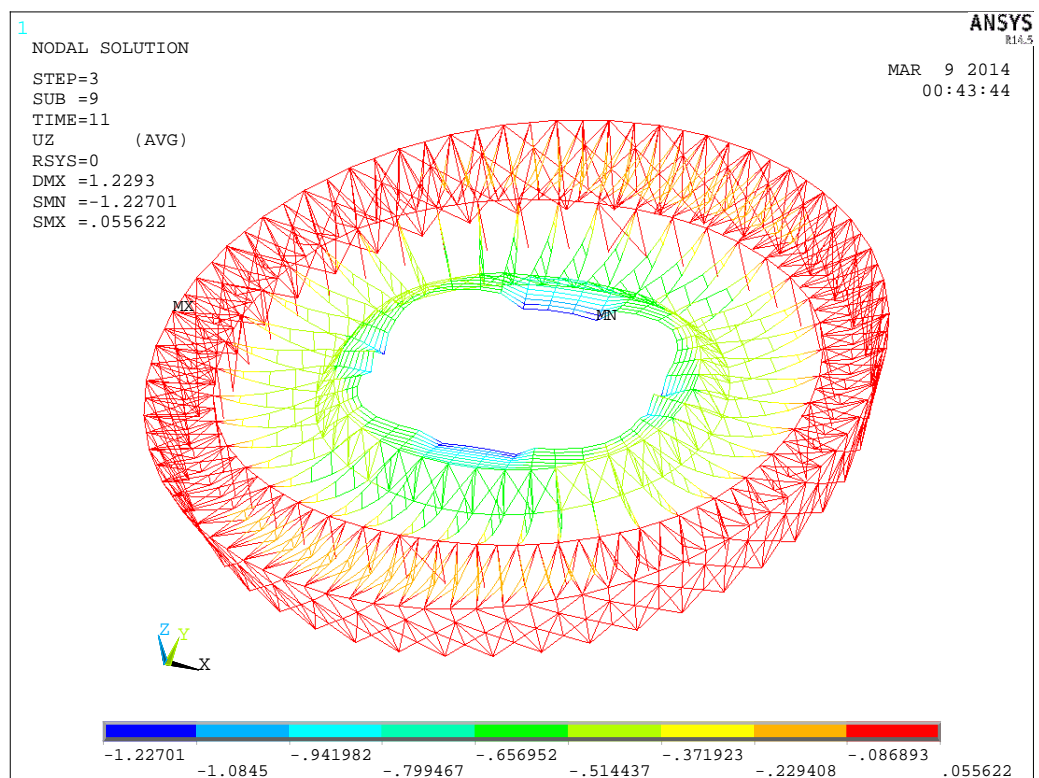


Рис.4.7.4. Сценарий 2. Перемещения по Z для стадиона квазистатики, м (T = 11 сек) Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

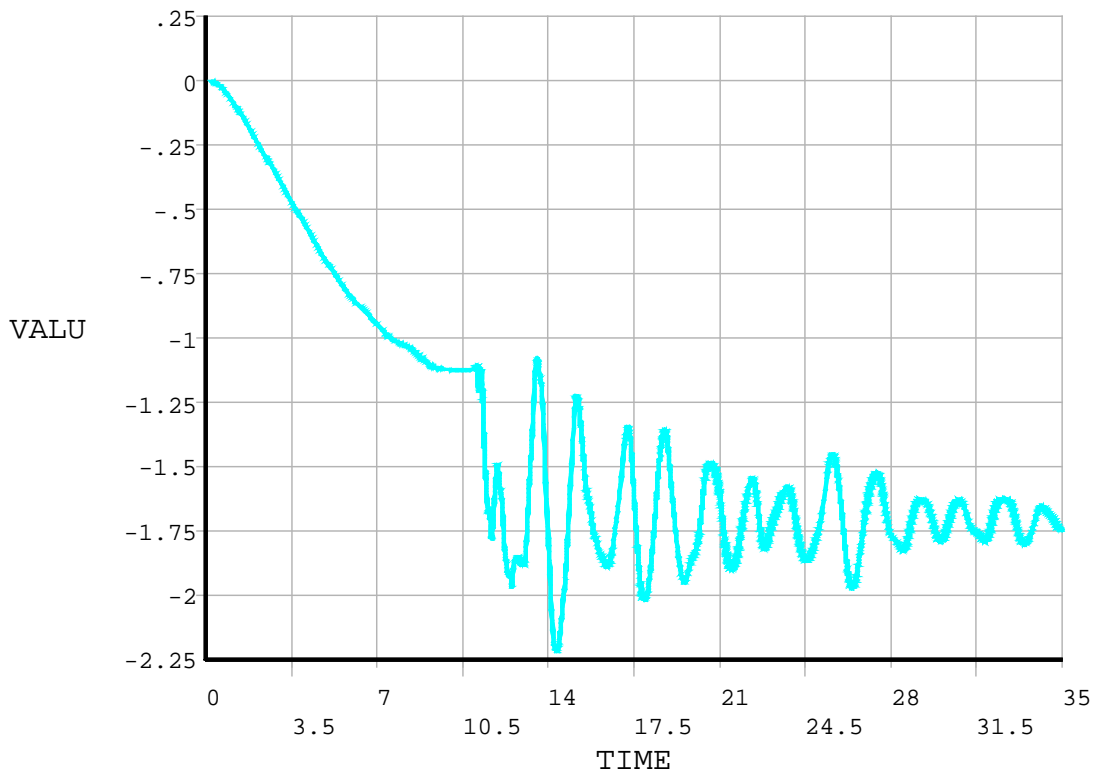


Рис.4.7.5. Сценарий 2. Вертикальные перемещения конца Г-консоли в зоне удаляемого элемента, м Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

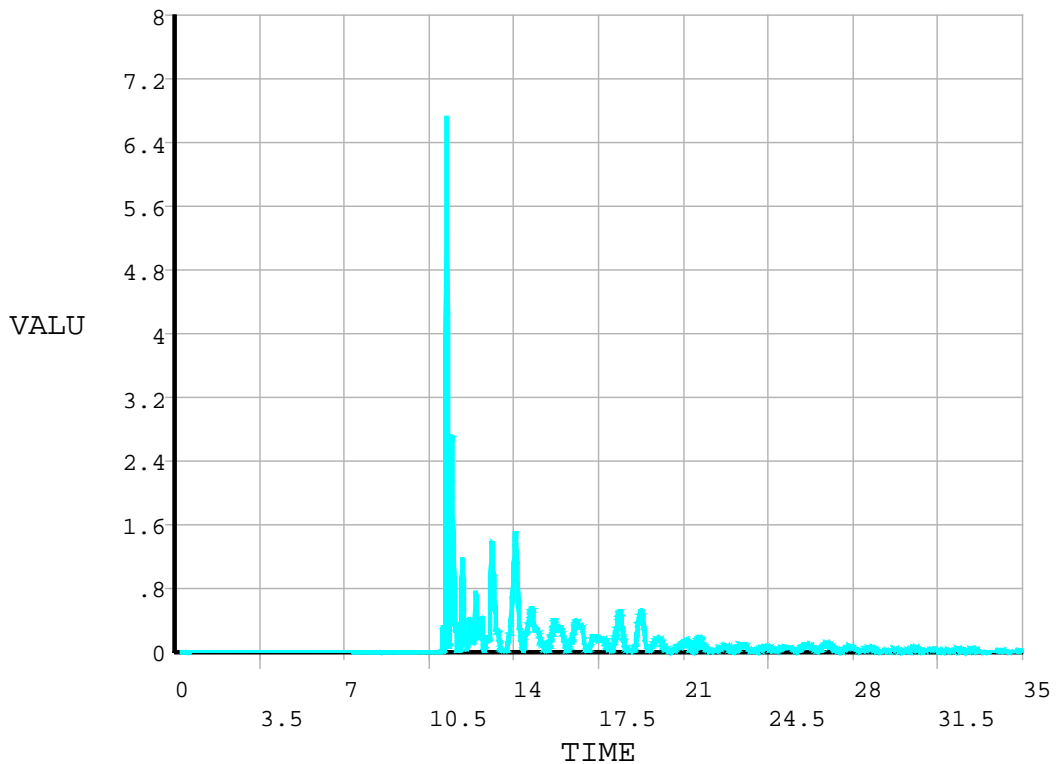


Рис.4.7.6. Сценарий 2. Кинетическая энергия на конце консоли в Г-элементе, кДж Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

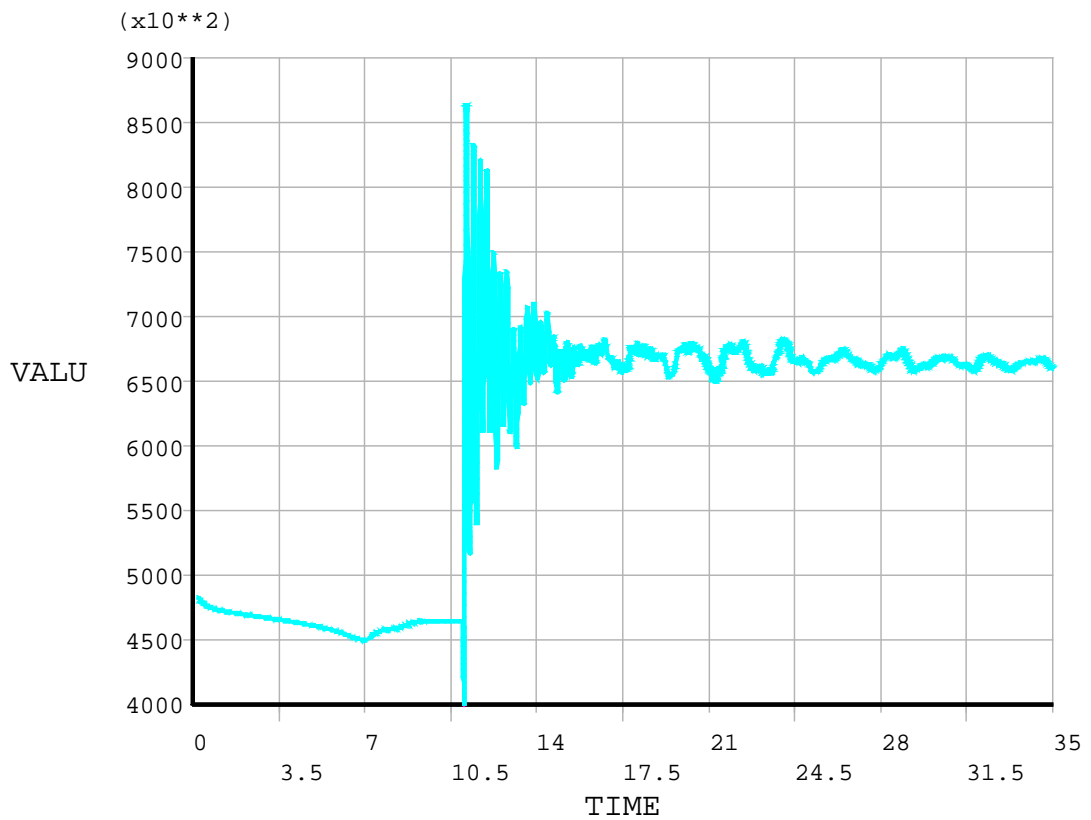


Рис.4.7.7. Сценарий 2. Изменение напряжений в нижнем поясе вантовой фермы, соседней к выключаемому элементу, кПа Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

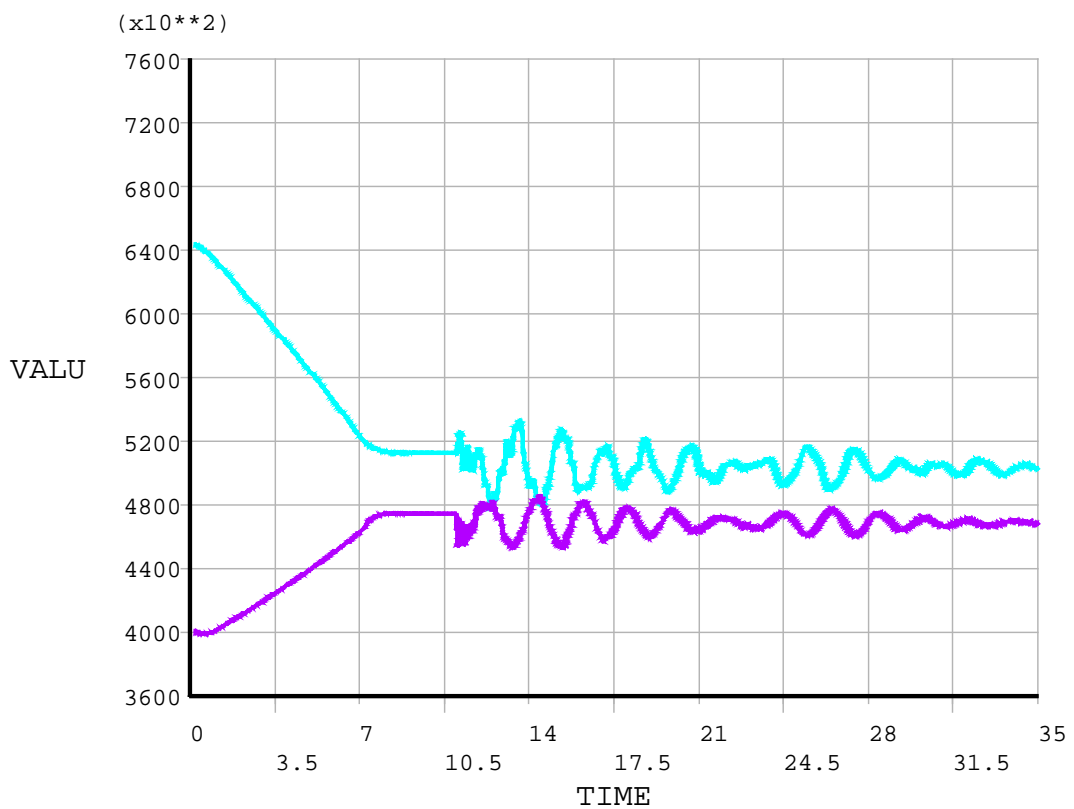


Рис.4.7.8. Сценарий 2. Изменение напряжений в нижнем и верхнем поясах вантового кольца, кПа. Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

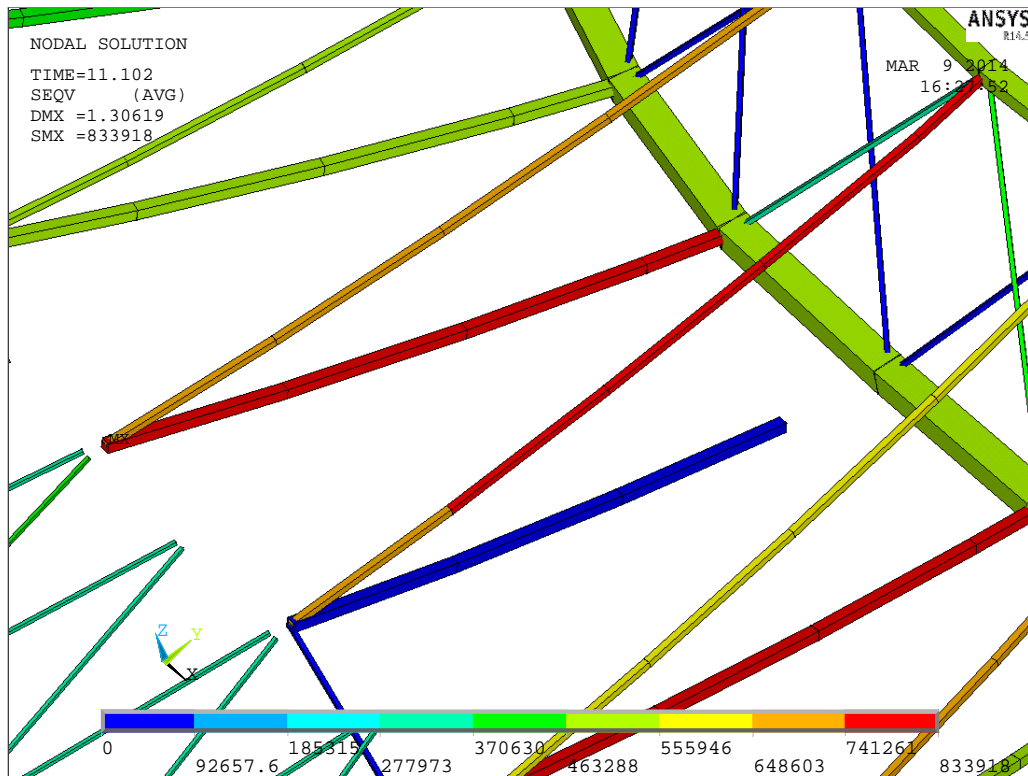


Рис.4.7.9. Сценарий 2. Напряжения в вантах в момент времени 11,102, кПа Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

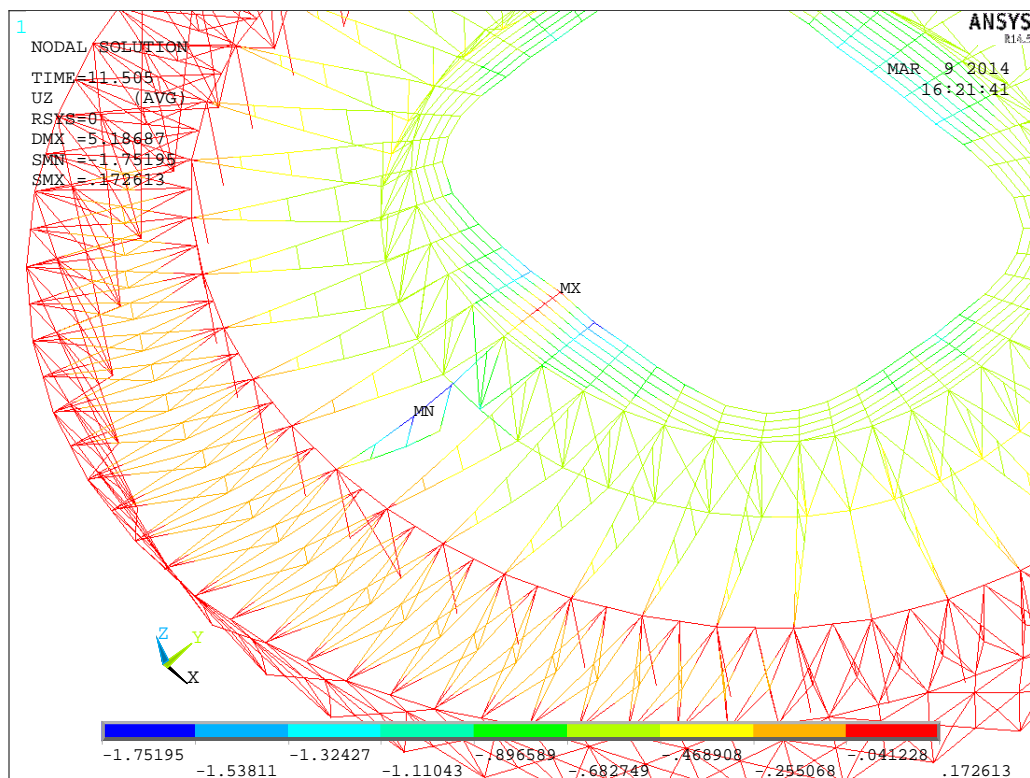


Рис.4.7.10. Сценарий 2. Вертикальные перемещения UZ в момент времени 11,505 сек, м Стадион в г.Волгоград (ПК ANSYS Mechanical).

4.8. Динамические расчеты системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» на сейсмические воздействия.

Динамический расчет системы «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов» на сейсмические воздействия уровня 7 баллов, заданное трехкомпонентной акселерограммой, проводился для стадиона в г. Ростов-на-Дону [12].

Модуль упругости железобетонных конструкций принят равным начальному.

Расчет выполнялся без учета физической нелинейности с применением метода прямого интегрирования Ньюмарка уравнений динамики во времени. Шаг интегрирования 0.01 с. Демпфирование принято 5% от критического.

Эквивалентное релеевское демпфирование выражалось через коэффициенты

$$\alpha = \frac{4 \times 3.14 \times \text{damp} \times f_1 \times f_2}{f_1 + f_2} = 0.490$$

$$\beta = \frac{\text{damp}}{3.14 \times (f_1 + f_2)} = 0.00047,$$

где damp – величина демпфирования 0.05 (5%), f1 и f2 – начальная и конечная частота демпфируемого диапазона (0.8 Гц и 33 Гц соответственно).

Таблица 4.8.1

Комбинации при расчете на сейсмическое воздействие по акселерограмме

№	Загрузка	Комбинации			
		1	2	4	6
1	Собственный вес	0.9	0.9	0.9	0.9
2	Постоянная	0.9	0.9	0.9	0.9
3	Технологическая	0.8	0.8	0.8	0.8
4	Снеговая 1		0.5		
5	Снеговая 2				
6	Снеговая 3			0.5	
7	Снеговая 4				
8	Снеговая 5				0.5
9	Снеговая 6				
10	Снеговая 7				
11	Гололедная		0.5	0.5	0.5
22	Сейсмическое	1.0	1.0	1.0	1.0

Коэффициенты приведения расчетных масс для сейсмического расчета:

- постоянные нагрузки – 0.9;
- временные длительные – 0.8;
- кратковременные – 0.5.

В комбинации не включаются ветровые и температурные загрузки.

Нагружение квазистатическим воздействием производилось на протяжении первых 7 секунд счета, на следующем этапе подключалась 3-х компонентная акселерограмма.

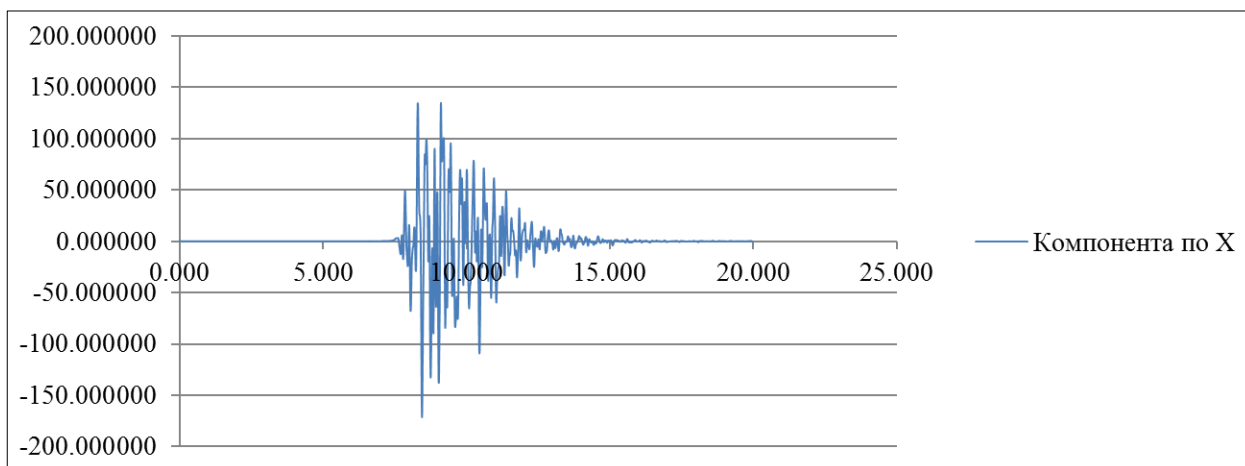


Рис.4.8.1. Составляющая трехкомпонентной акселерограммы по X
(по оси абсцисс – время, с, по оси ординат – ускорение, см/с²)
Стадион в г.Ростов-на-Дону

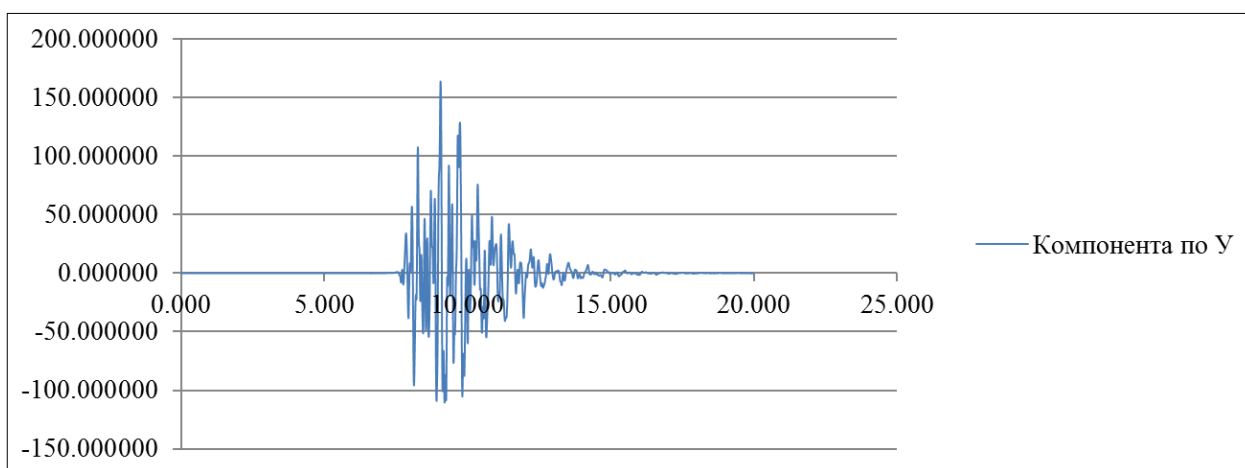


Рис.4.8.2. Составляющая трехкомпонентной акселерограммы по Y
(по оси абсцисс – время, с, по оси ординат – ускорение, см/с²)
Стадион в г.Ростов-на-Дону

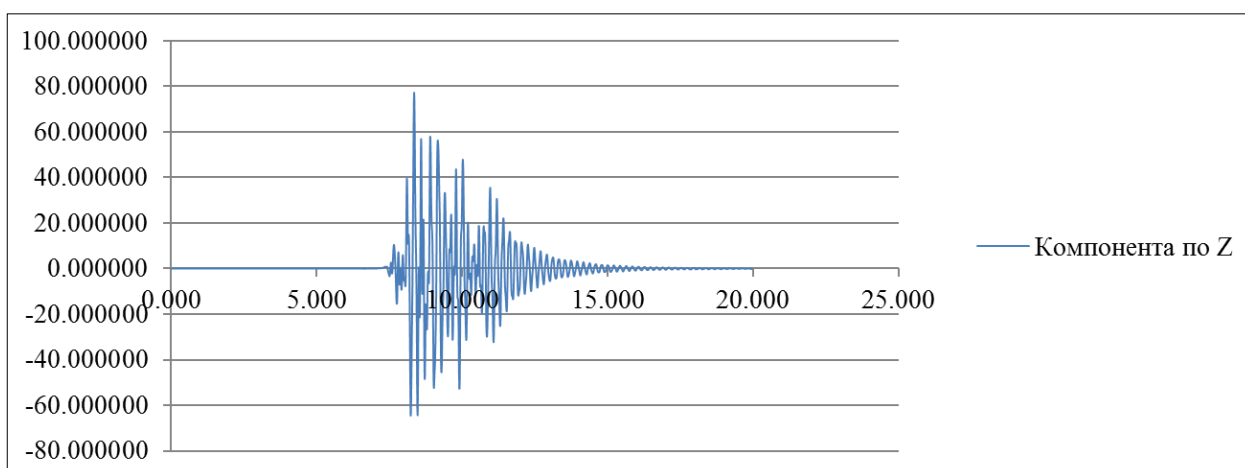


Рис.4.8.3. Составляющая трехкомпонентной акселерограммы по Z
(по оси абсцисс – время, с, по оси ординат – ускорение, см/с²) .
Стадион в г.Ростов-на-Дону

С учетом расчетов на акселерограммы одним из важных вопросов анализа и проверки прочности и устойчивости конструкции является определение вклада от сейсмического воздействия.

Для конструкций, рассчитанных в линейной постановке, вводится понижающий множитель $K1 = 0.25$ с целью учета нелинейной работы конструкций покрытия. С учетом этого необходимо провести процедуру вычитания статической составляющей из динамической.

За статические усилия принимаются усилия на момент окончания процедуры квазистатического нагружений конструкции (условно момент времени в модели 7 секунд). На следующем этапе для зоны наибольшего вклада акселерограммы в перемещения и усилия (условно от 7 до 15 секунд) производится вычленение динамической составляющей, которая перемножается с коэффициентом $K1 = 0.25$. Финальное усилие получается по следующей формуле:

$$F = (F_{sta} + K1 \times (F_{sei} - F_{sta})) \times \gamma_n$$

Выполненными расчетными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий): состояние несущих металлических конструкций покрытия удовлетворяет нормативным критериям несущей способности (деформативности, прочности и устойчивости) при рассмотренных особых сочетаниях нагрузок и воздействий;

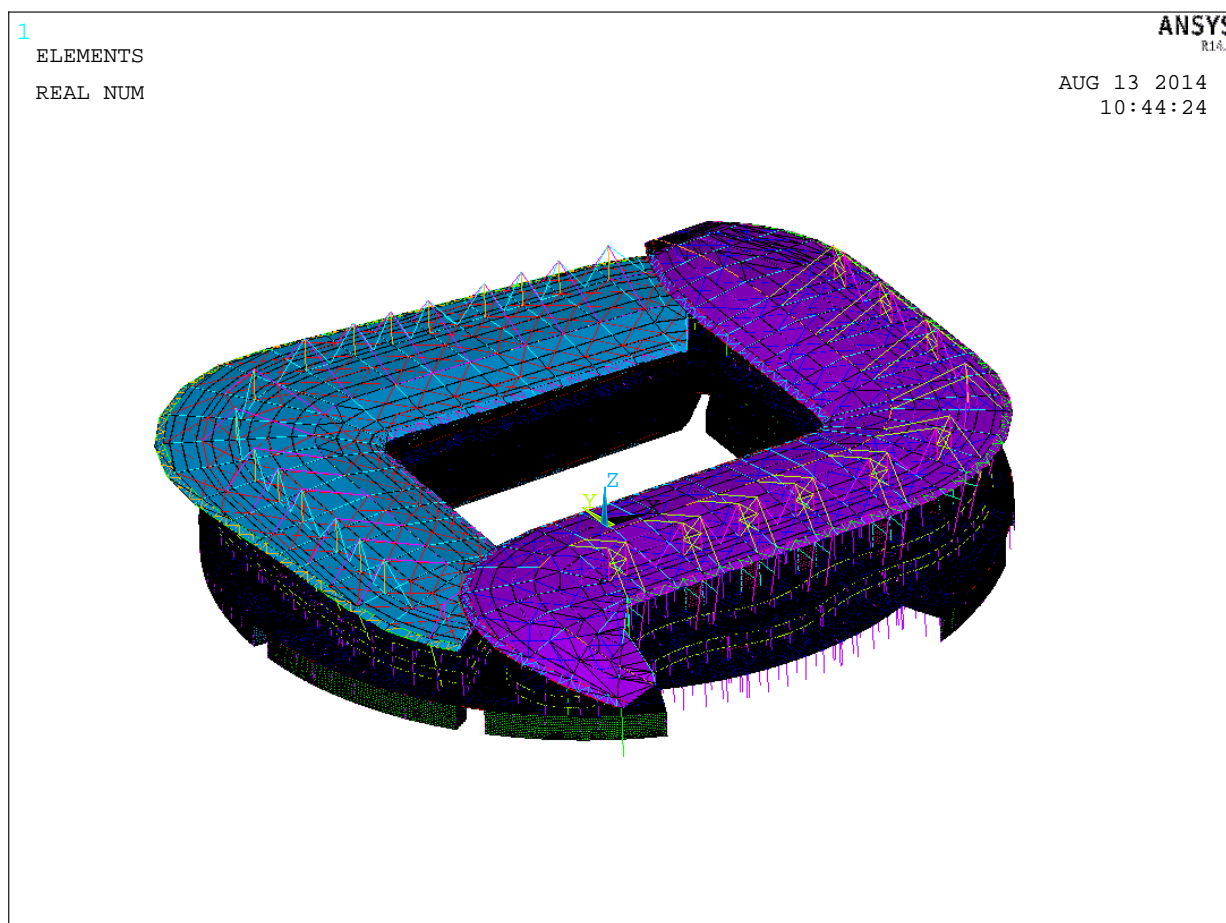


Рис.4.8.4. Общий вид КЭ-модели стадиона в г.Ростов-на-Дону с заземленным фундаментом. Убран ряд ЖБ-блоков, которые не связаны с покрытием для скорости счета. (ПК ANSYS Mechanical).

На основании проведенных расчетных исследований определены максимальные амплитудные перемещения узлов покрытия с учетом сейсмического воздействия. Основные значения представлены в таблицах ниже (амплитуда, узел и время события).

Таблица 4.8.2

Основные параметры перемещений по СВ-покрытию

Комбинация	Параметр	СВ-покрытие					
		UX _{MIN}	UX _{MAX}	UY _{MIN}	UY _{MAX}	UZ _{MIN}	UZ _{MAX}
1	Узел	393726	392096	395050	395150	392861	394542
	Перемещение, м	-0.065	0.099	-0.102	0.064	-0.338	0.113
	Время, с	11.96	9.72	9.88	10.12	9.32	9.72
2	Узел	394195	395055	392045	393996	392861	394535
	Перемещение, м	-0.128	0.120	-0.120	0.117	-0.426	0.132
	Время, с	11.72	10.92	9.48	11.4	11.24	9.48
4	Узел	393726	395055	392045	393996	392861	394772
	Перемещение, м	-0.107	0.117	-0.163	0.109	-0.565	0.174
	Время, с	9.88	10.92	9.56	11.4	11.32	9.56
6	Узел	393726	395049	392045	394124	392861	394772
	Перемещение, м	-0.120	0.128	-0.163	0.155	-0.570	0.177
	Время, с	9.88	10.92	9.56	11.96	12.44	9.56

Таблица 4.8.3

Основные параметры перемещений по ЮЗ-покрытию

Комбинация	Параметр	ЮЗ-покрытие					
		UX _{MIN}	UX _{MAX}	UY _{MIN}	UY _{MAX}	UZ _{MIN}	UZ _{MAX}
1	Узел	388761	388761	387168	387168	388296	390207
	Перемещение, м	-0.292	0.282	-0.106	0.108	-0.450	0.113
	Время, с	11.56	11.4	13.16	13	12.52	12.36
2	Узел	388761	388761	388959	388326	388296	390211
	Перемещение, м	-0.284	0.317	-0.149	0.156	-0.510	0.083
	Время, с	10.52	10.68	9.64	10.12	10.76	9.64
4	Узел	388761	388761	388296	388957	388296	390211
	Перемещение, м	-0.30	0.32	-0.13	0.13	-0.52	0.08
	Время, с	10.52	10.68	11.64	9.48	10.76	9.64
6	Узел	388761	388761	388296	389643	388296	390211
	Перемещение, м	-0.292	0.322	-0.125	0.121	-0.507	0.080
	Время, с	10.52	10.68	11.64	11.08	10.76	9.64

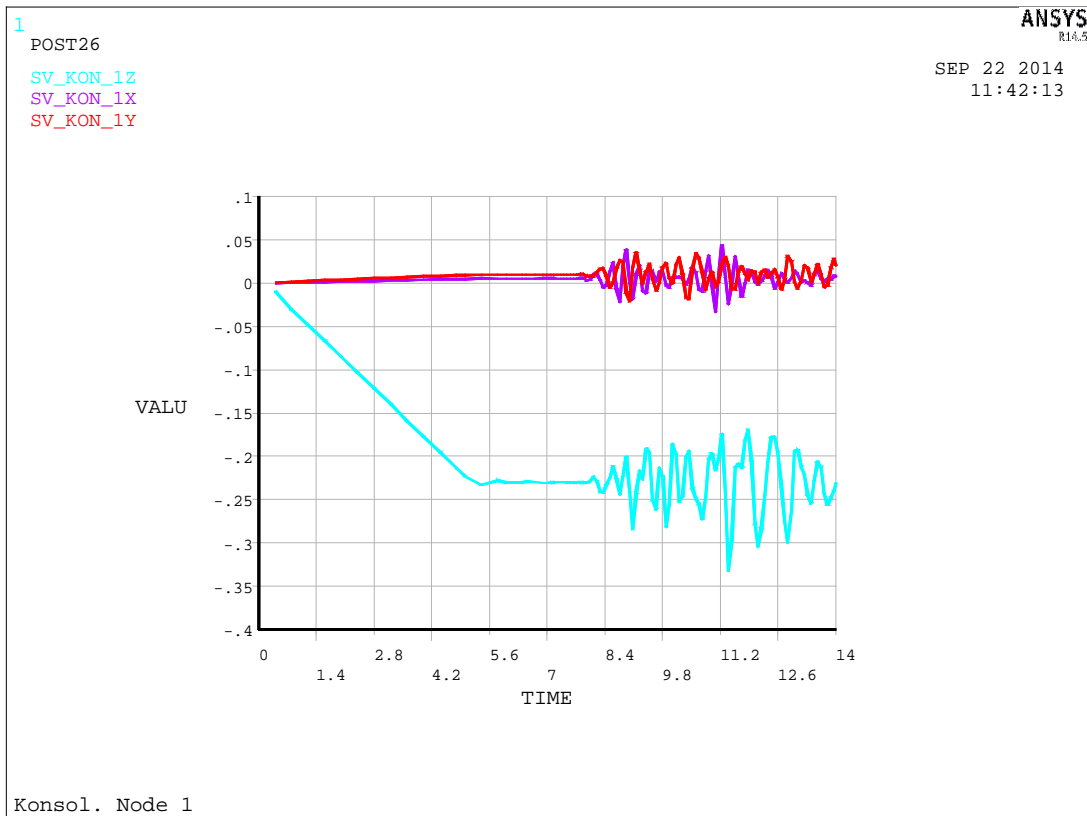


Рис.4.8.5. СВ-покрытие. Комбинация 1.
Перемещение узла (угол 1) консоли по направлениям X, Y, Z (м, сек.)
Стадион в г.Ростов-на-Дону. (ПК ANSYS Mechanical).

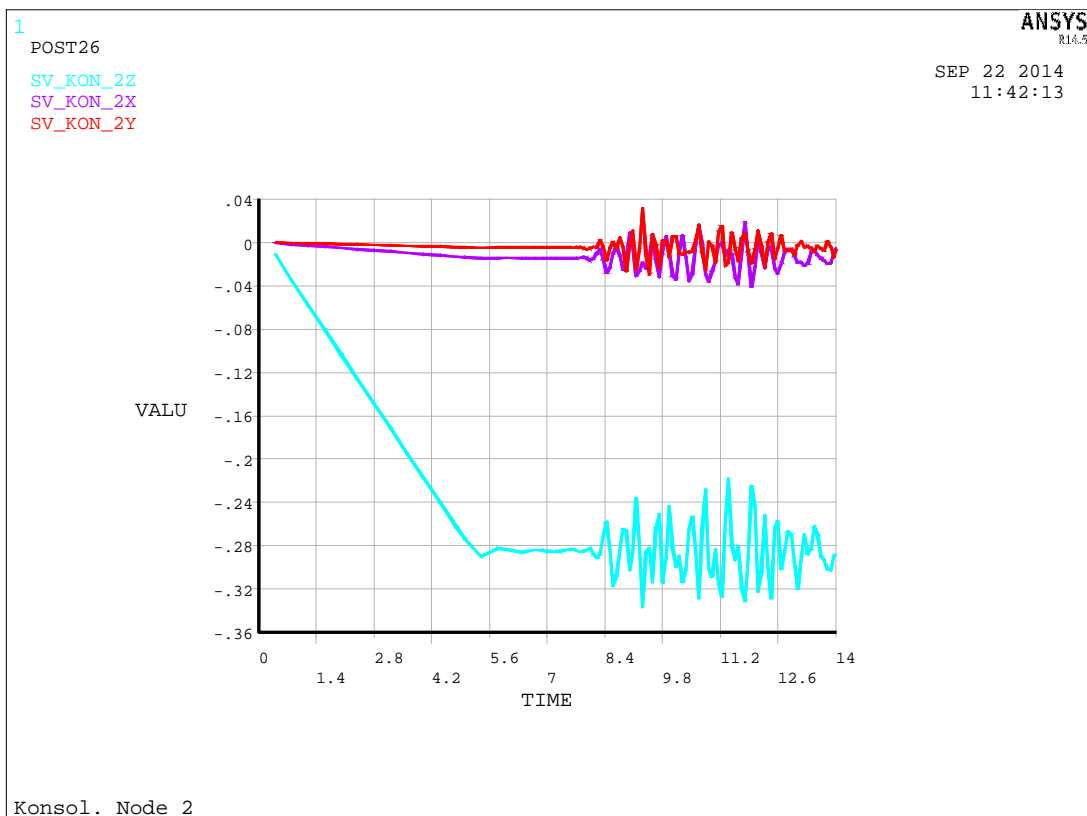


Рис.4.8.6. СВ-покрытие. Комбинация 1.
Перемещение узла (угол 3) консоли по направлениям X, Y, Z (м, сек.)
Стадион в г.Ростов-на-Дону. (ПК ANSYS Mechanical).

С учетом проведенных исследований составлены таблицы ускорений в опорных узлах стального покрытия на железобетонные трибуны

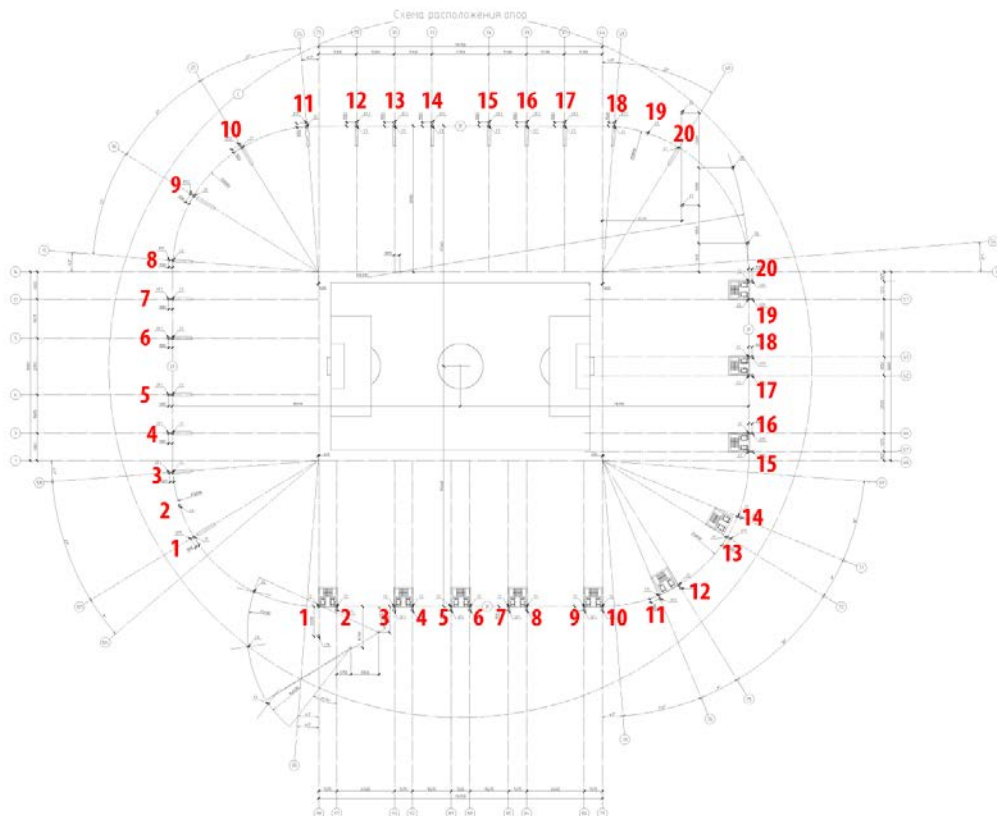


Рис.4.8.7. Схема расположения опорных узлов покрытия на железобетонные конструкции верхних трибун Стадион в г.Ростов-на-Дону.

Таблица 4.8.4

Комбинация 1. СВ-покрытие. Амплитудные значения ускорений (фрагмент таблицы)

Узел	Блок	Компонента	Мин., м/с ²	Макс., м/с ²
1	СВ	ACCX	-4.994	6.482
2	СВ	ACCX	-2.999	4.429
3	СВ	ACCX	-2.374	3.382
4	СВ	ACCX	-7.294	6.693
5	СВ	ACCX	-6.882	6.014
6	СВ	ACCX	-7.506	5.803
7	СВ	ACCX	-9.165	6.629
8	СВ	ACCX	-5.559	5.867
9	СВ	ACCX	-3.47	3.825
10	СВ	ACCX	-4.477	5.026
11	СВ	ACCX	-4.696	5.805
12	СВ	ACCX	-3.639	3.353
13	СВ	ACCX	-3.703	3.167
14	СВ	ACCX	-8.07	9.823
15	СВ	ACCX	-8.357	10.11
16	СВ	ACCX	-3.828	4.796
17	СВ	ACCX	-3.685	4.882
18	СВ	ACCX	-10.43	9.836
19	СВ	ACCX	-10.39	9.825
20	СВ	ACCX	-10.58	10.74

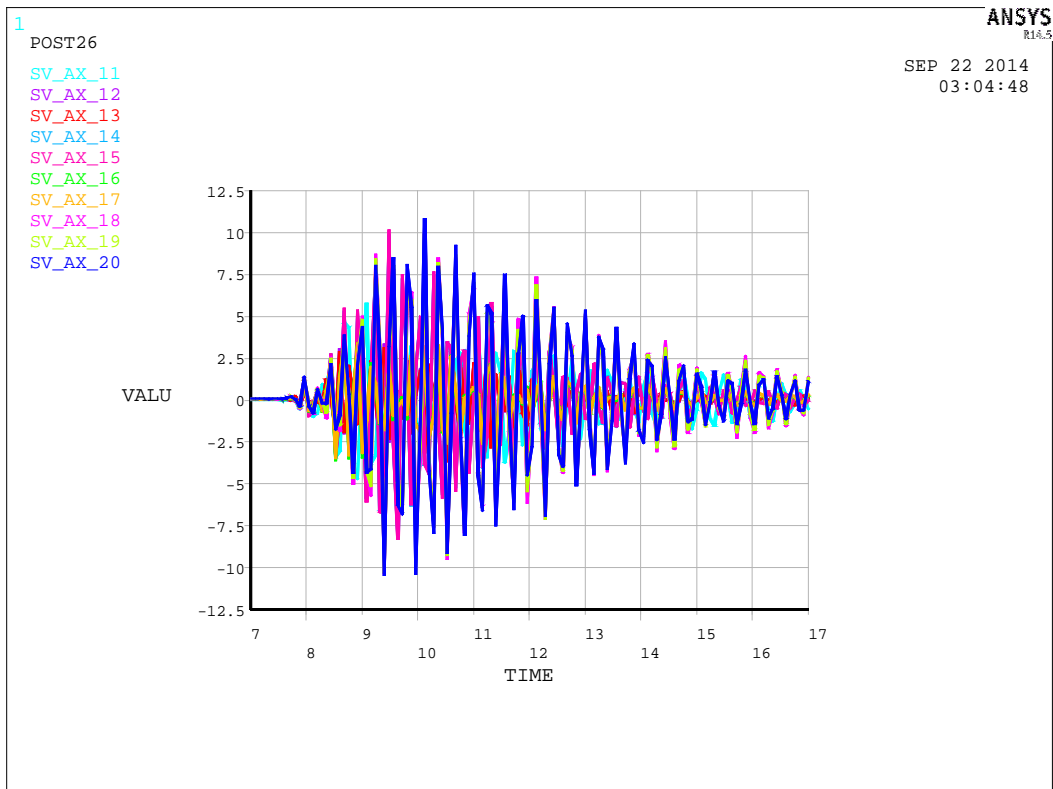


Рис.4.8.8. График ускорений в опорной группе узлов 11-20 по СВ-покрытию, комбинация 1, критерий: максимальная по модулю амплитуда по X, м/с² Стадион в г.Ростов-на-Дону. (ПК ANSYS Mechanical).

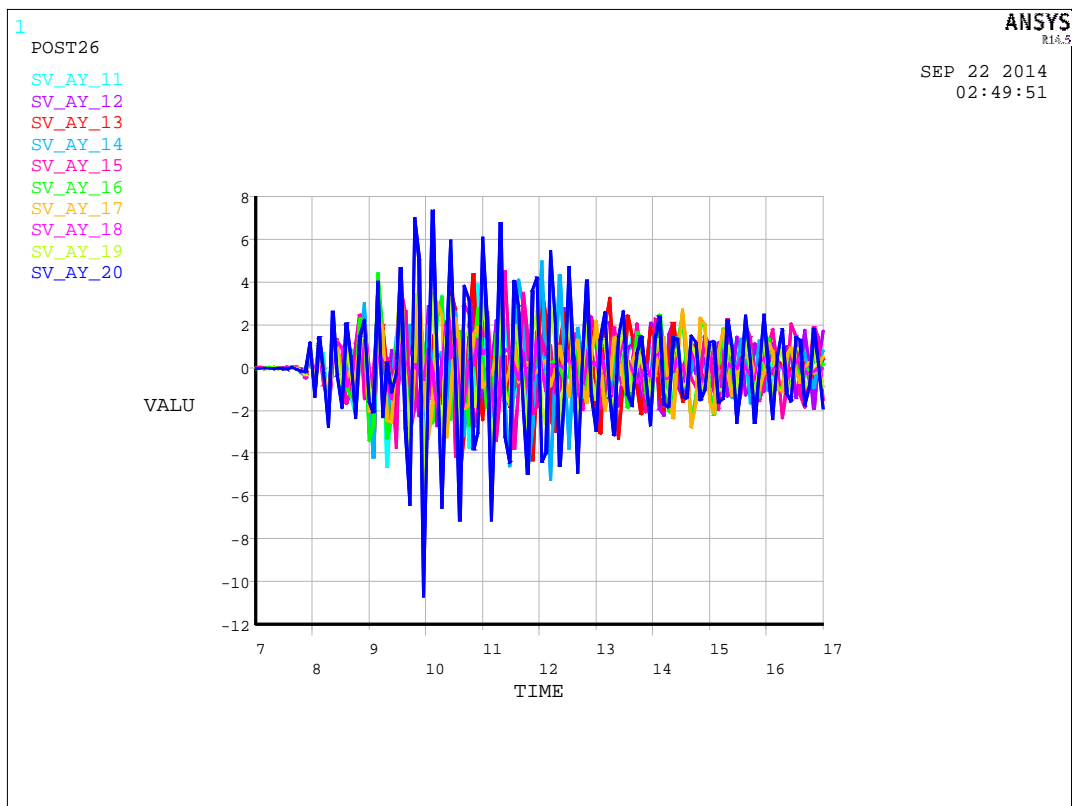


Рис.4.8.9. График ускорений в опорной группе узлов 11-20 по СВ-покрытию, комбинация 2, критерий: максимальная по модулю амплитуда по Y, м/с² Стадион в г.Ростов-на-Дону. (ПК ANSYS Mechanical).

4.9. Оптимизационный процесс дополнения и корректировки конструкций сборно-разборных (временных) трибун для удовлетворения критериев прочности и устойчивости несущих элементов конструкции и динамической комфортности (зыбкости) трибун.

Расчетное обоснование прочности и устойчивости конструкций временных трибун, установленных в уровне верхнего перекрытия, при сейсмическом воздействии с учетом податливости нижележащих железобетонных конструкций;

В составе конструкций некоторых стадионов возводимых и реконструируемых к проведению чемпионата мира для увеличения количества зрительских мест предусмотрено устройство временных сборно-разборных трибун. В частности такие трибуны установлены на стадионе в г.Екатеринбург [15, 20]. В Екатеринбурге трибуны располагаются с двух сторон, северной и южной (сектора за воротами) за пределами основных конструкций чаши стадиона и установлены на собственных фундаментах. Трибуны представляют собой сложную пространственную стержневую систему, высота конструкции достигает м.

Моделирование и расчет временных сборно-разборных трибун в г.Екатеринбург имело многоитерационный характер. Для удовлетворения критериев прочности потребовались корректировки первоначальных вариантов конструкций временных трибун на основании результатов статических и динамических расчетов. В результате проведенных расчетных исследований были удовлетворены как требования прочности и устойчивости конструкций так и физиологические требования по «зыбкости».

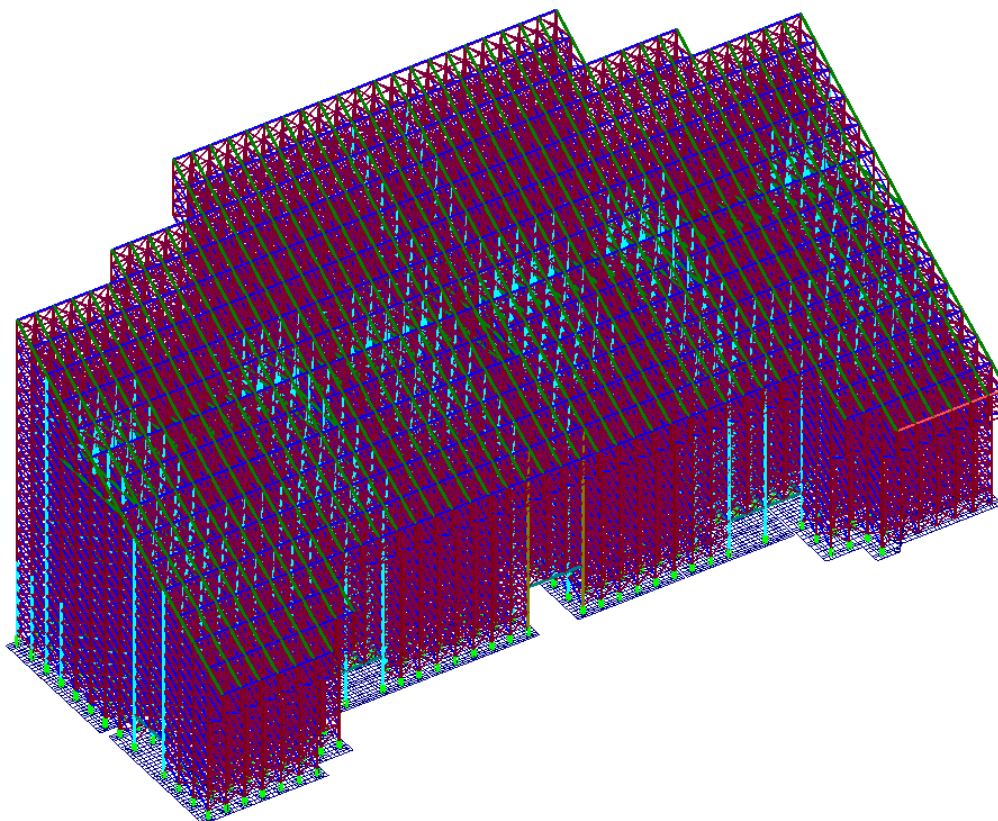


Рис.4.9.1. Разработанная КЭ-модель несущих конструкций северной сборно-разборной трибуны в г.Екатеринбург. ПК SCAD Office.

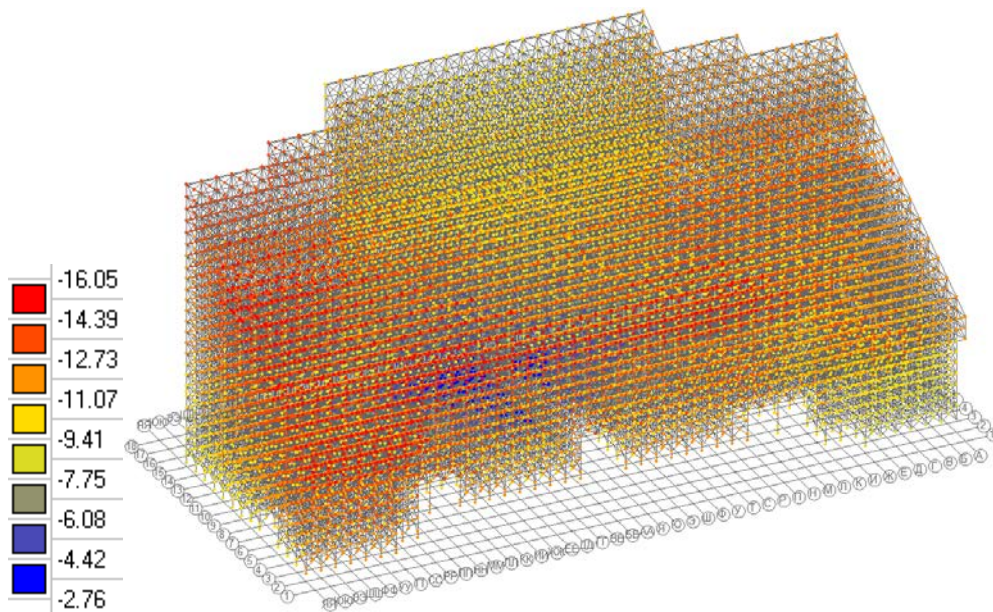


Рис.4.9.2. Северная сборно-разборная трибуна в г.Екатеринбург.
Вертикальные перемещения, мм. (ПК SCAD Office).

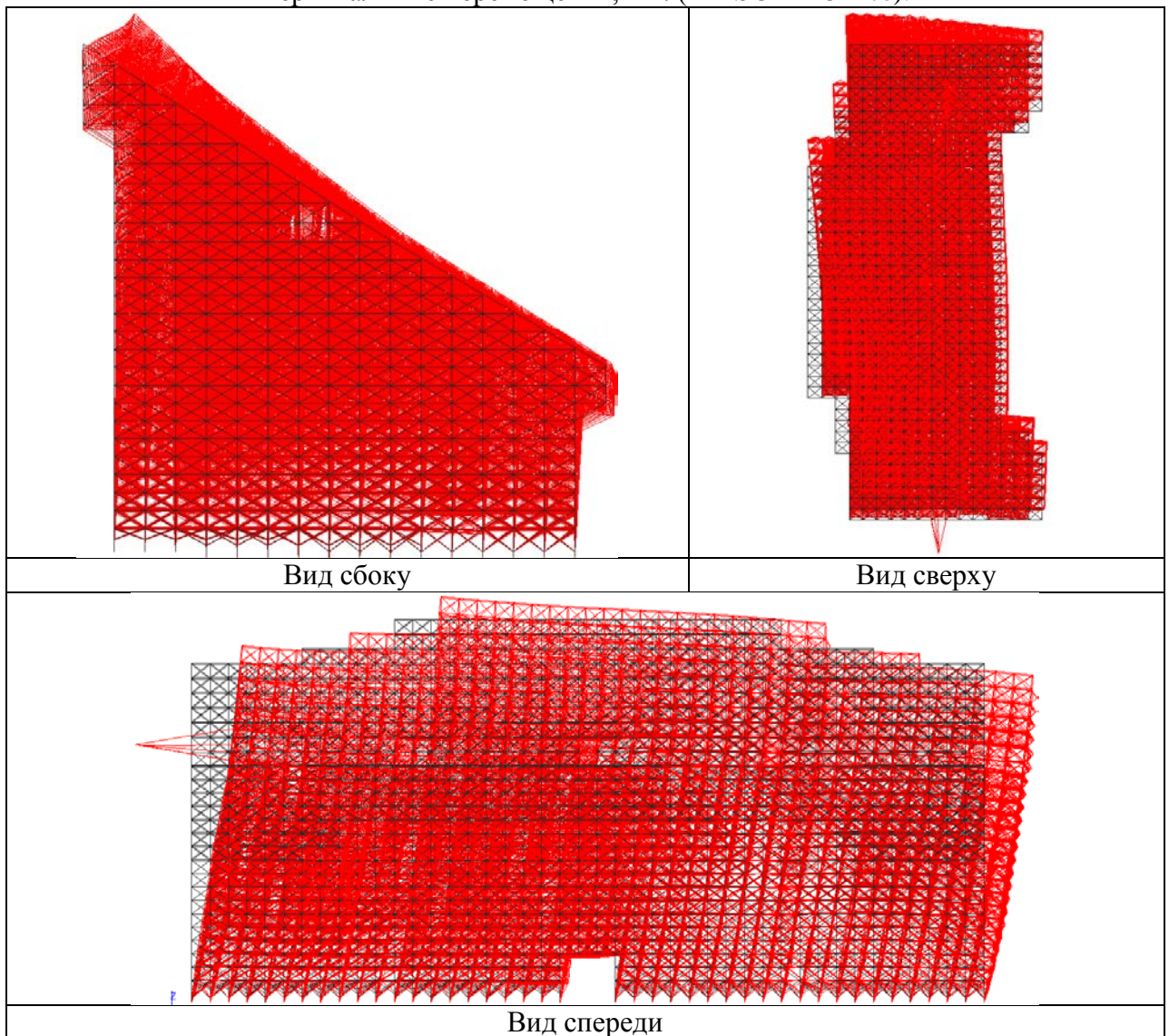


Рис.4.9.3. 1-я собственная форма колебаний северной сборно-разборной трибуны, включающая колебания в горизонтальной плоскости, $f_3 = 4,826$ Гц. (ПК SCAD Office).

4.10. Сопоставление результатов альтернативных расчетов, выполненных согласно требованиям специальных технических условий, в верифицированных/сертифицированных программных комплексах.

Анализ современного состояния проектирования зданий и сооружений свидетельствует о необходимости реализации комплекса мер по повышению качества расчетных обоснований проектных решений строительных конструкций. Эти меры в первую очередь касаются объектов, не имеющих в отечественной практике ранее запроектированных и построенных аналогов, таких как высотные здания, уникальные торговые, спортивные сооружения с большепролетными покрытиями, здания сложной архитектурной формы.

Для повышения качества расчетных обоснований проектных решений современных сложных объектов строительства, во избежание просчетов в проектировании, приводящих к аварийным ситуациям в ходе строительства и эксплуатации (см. статью о нашем опыте экспертиз), разработаны требования, согласно которым проектным организациям рекомендуется осуществлять расчеты не менее чем по двум моделям, независимо разработанным в двух верифицированных ПК, проводить сопоставительный анализ полученных результатов.

Авторским коллективом выработан «стандарт» и проведено, согласно ему, сопоставление альтернативных результатов расчетов. Эти альтернативные расчеты выполнены согласно требованиям специальных технических условий (а в последнее время – и действующих ГОСТов) в верифицированных/сертифицированных программных комплексах. Для моделей подсистем «металлические конструкции покрытия» – ANSYS Mechanical, MIDAS Civil, Robot Structural, SOFiStiK; для моделей подсистемы «основание – железобетонные конструкции чаши» – ANSYS Mechanical, SCAD, Лира, SOFiStiK;

Сопоставлялись основные интегральные характеристики конструкций, такие как масса сооружения, собственные частоты и формы колебаний, перемещения сооружения целиком и отдельных конструктивных элементов, усилия в основных типах несущих конструктивных элементов. Для того, чтобы добиться приемлемого различия значений, в тесном взаимодействии с коллегами, выполняющими альтернативный расчет, были проведены, калибровки расчетных моделей и устранены все возможные расхождения в жесткостных характеристиках, нагрузках и т.д. При сопоставлении результатов альтернативных расчетов, удалось свести расхождения в значениях сравниваемых параметров конструкций до 5-10%.

Ниже приведены табличные и графические материалы сопоставительных отчетов по расчетным исследованиям состояния конструкций стадионов в городах Волгоград [11, 21] и Екатеринбург [15, 20].

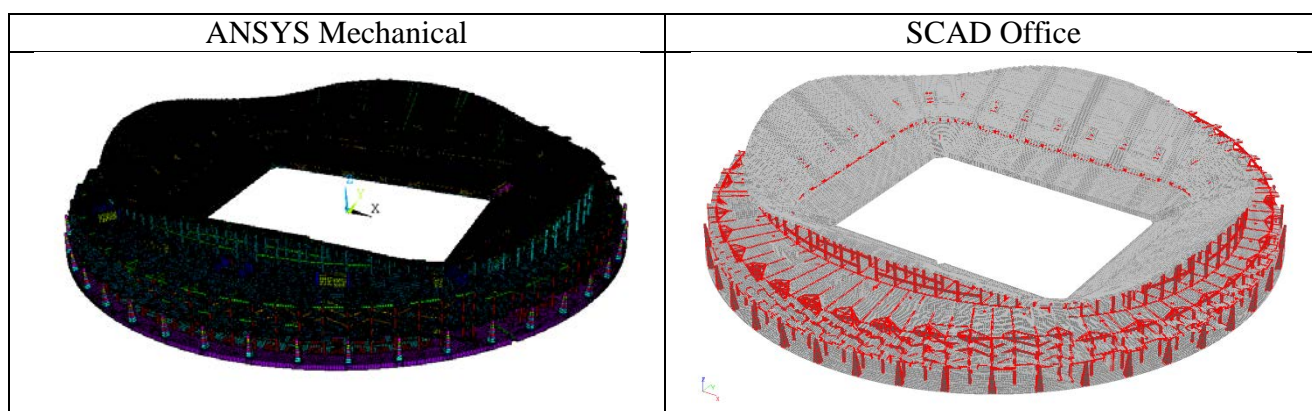


Рис.4.10.1. Расчетные КЭ-модели чаши и фундамента стадиона в г. Волгоград. ПК ANSYS Mechanical и ПК SCAD Office

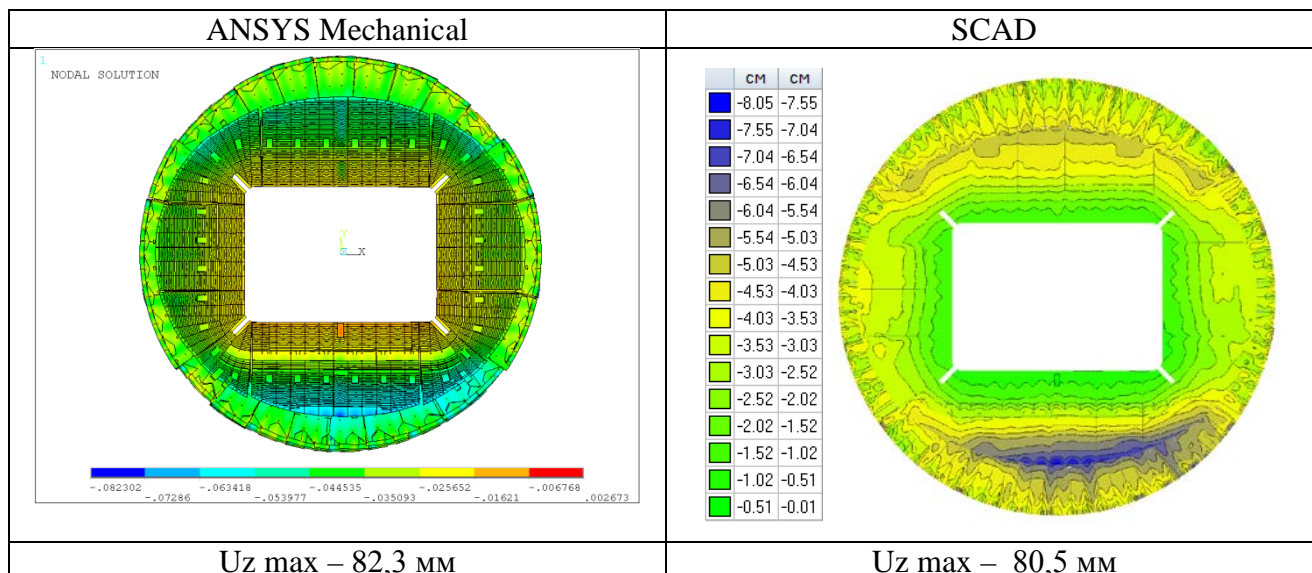


Рис.4.10.2. Вертикальные перемещения, основное сочетание нагрузок.
КЭ-модели железобетонных конструкций чаши и фундаментов стадиона в г. Волгоград.
ПК ANSYS Mechanical и ПК SCAD Office

Сопоставление погонных моментов в фундаментной плите (на отм. -0.000)

Таблица 4.10.1.

Сектор (диапазон осей)	ANSYS		SCAD		ANSYS		SCAD	
	$M_x, \text{т} \times \text{м/м}$		$M_x, \text{т} \times \text{м/м}$		$M_y, \text{т} \times \text{м/м}$		$M_y, \text{т} \times \text{м/м}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
152-184	-287.5	334.8	-316,6	320,7	-295.6	263.5	-349,0	364,6
252-284	-419.9	245.9	-423,5	242,6	-386.7	298.9	-358,2	279,9
204-252	-176.5	167.8	-151,9	180,7	-251.2	318.2	-139,7	217,0
304-352	-211.5	112.9	-153,4	168,7	-240.6	293.0	-240,1	201,8
352-384	-239.7	203.7	-243,0	206,0	-276.6	201.5	-230,2	196,2
452-484	-236.4	214.9	-235,8	195,4	-330.2	275.7	-195,0	260,6
404-452	-284.3	319.4	-286,4	301,3	-224.3	283.4	-287,6	301,4

Сопоставление погонных моментов в плите 1-го этажа (на отм. 8.250)

Таблица 4.10.2.

Сектор (диапазон осей)	ANSYS		SCAD		ANSYS		SCAD	
	$M_x, \text{т} \times \text{м/м}$		$M_x, \text{т} \times \text{м/м}$		$M_y, \text{т} \times \text{м/м}$		$M_y, \text{т} \times \text{м/м}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
104-152	-18.9	17.0	-21,4	16,3	-18.7	13.1	-23,2	13,0
152-184	-24.9	20.3	-24,3	15,1	-16.3	12.6	-22,7	15,7
252-284	-23.3	14.7	-29,8	14,3	-19.8	14.3	-23,6	18,5
204-252	-18.1	15.1	-23,3	14,3	-19.4	14.4	-24,8	16,7
304-352	-20.8	14.7	-28,7	14,0	-20.2	18.2	-25,3	14,2
352-384	-20.8	13.4	-27,9	15,7	-18.6	13.5	-25,5	13,3
452-484	-18.8	11.4	-27,8	15,6	-19.3	14.7	-25,9	14,5
404-452	-20.8	14.0	-29,4	16,4	-19.5	16.7	-24,5	16,8

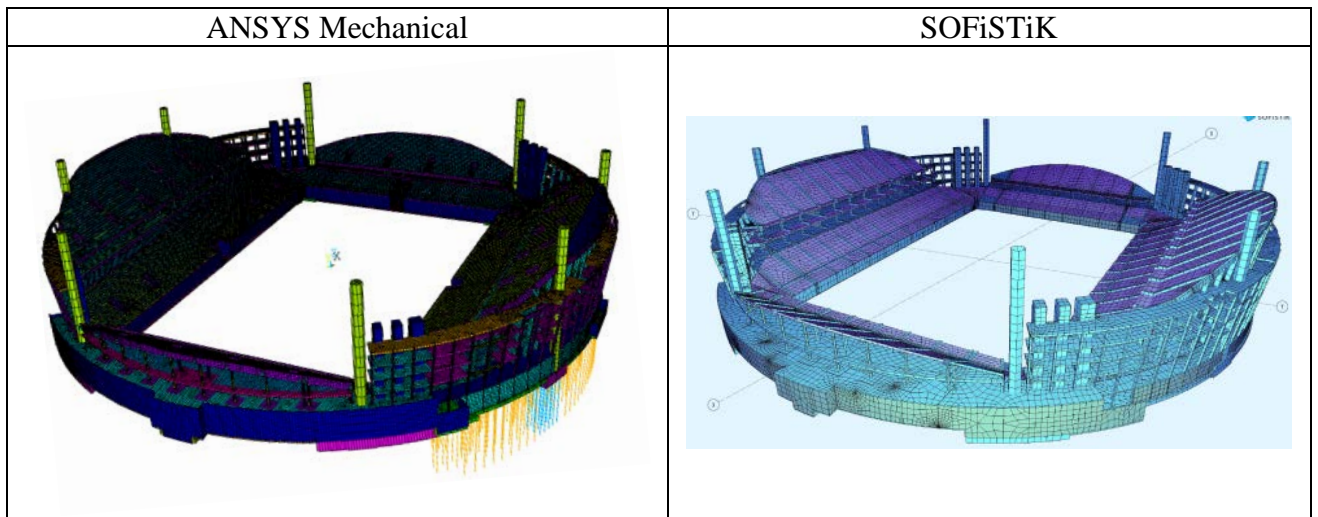


Рис.4.10.3. Расчетные КЭ-модели чаши стадиона в г. Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК SOFiSTiK.

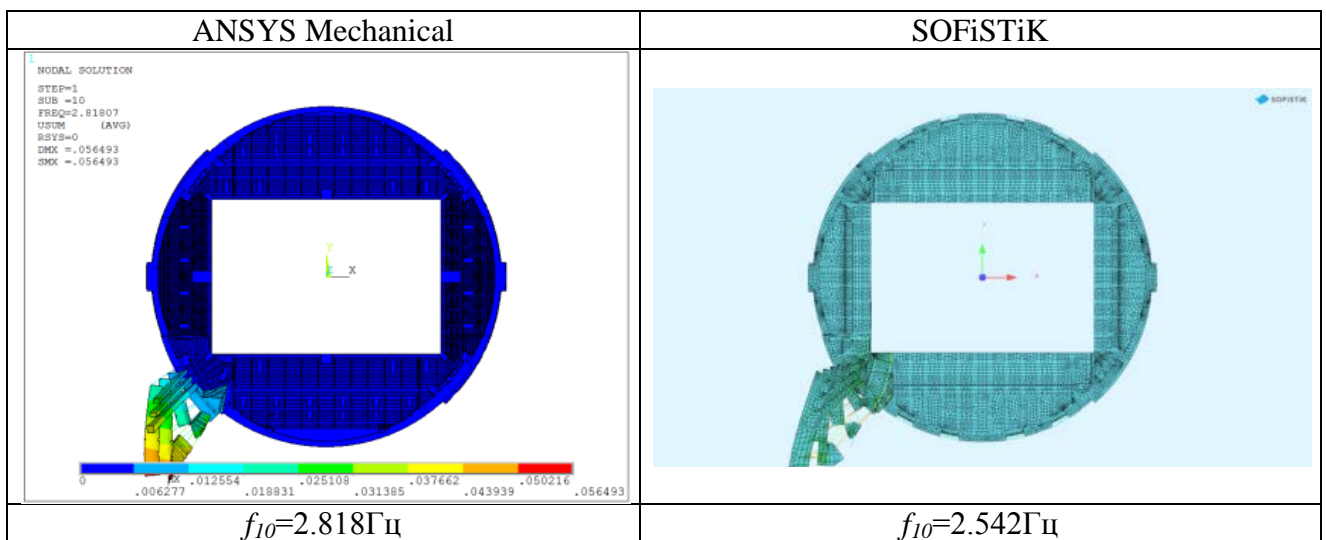


Рис.4.10.4. Сопоставление собственных частот и форм колебаний чаши стадиона. Стадион в г. Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК SOFiSTiK.

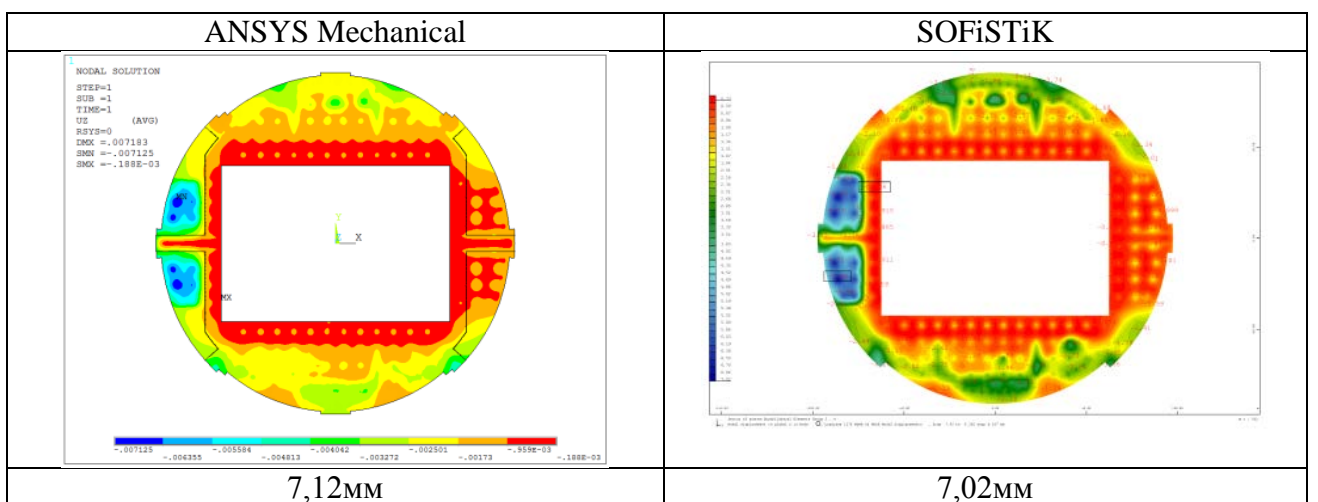


Рис.4.10.5. Сопоставление перемещений от нормативных нагрузок. Фундаментная плита. Стадион в г. Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК SOFiSTiK.

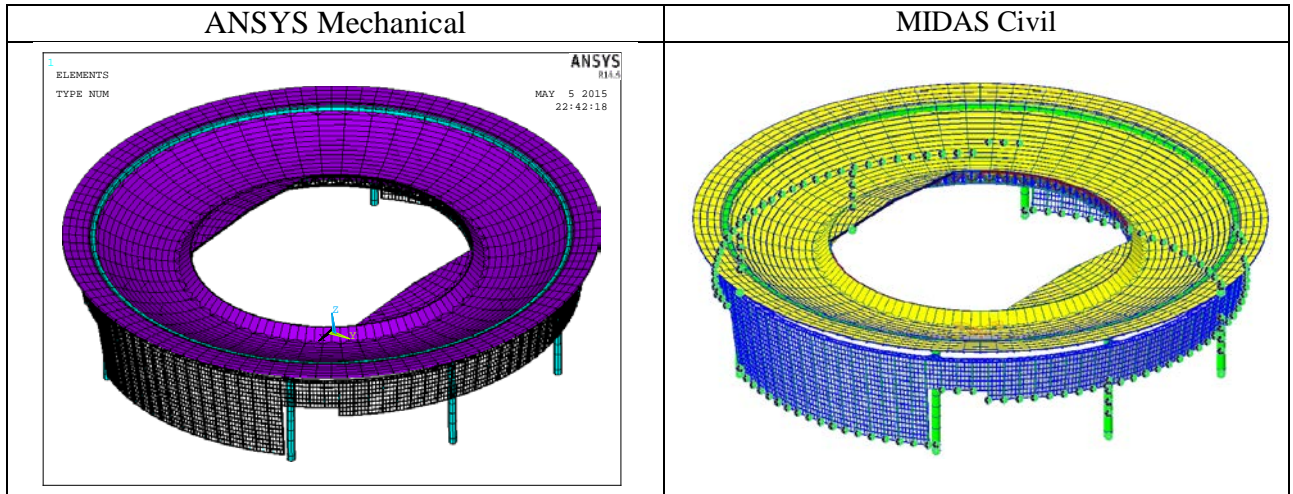


Рис.4.10.6. Расчетные КЭ-модели покрытия стадиона в г. Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК MIDAS Civil.

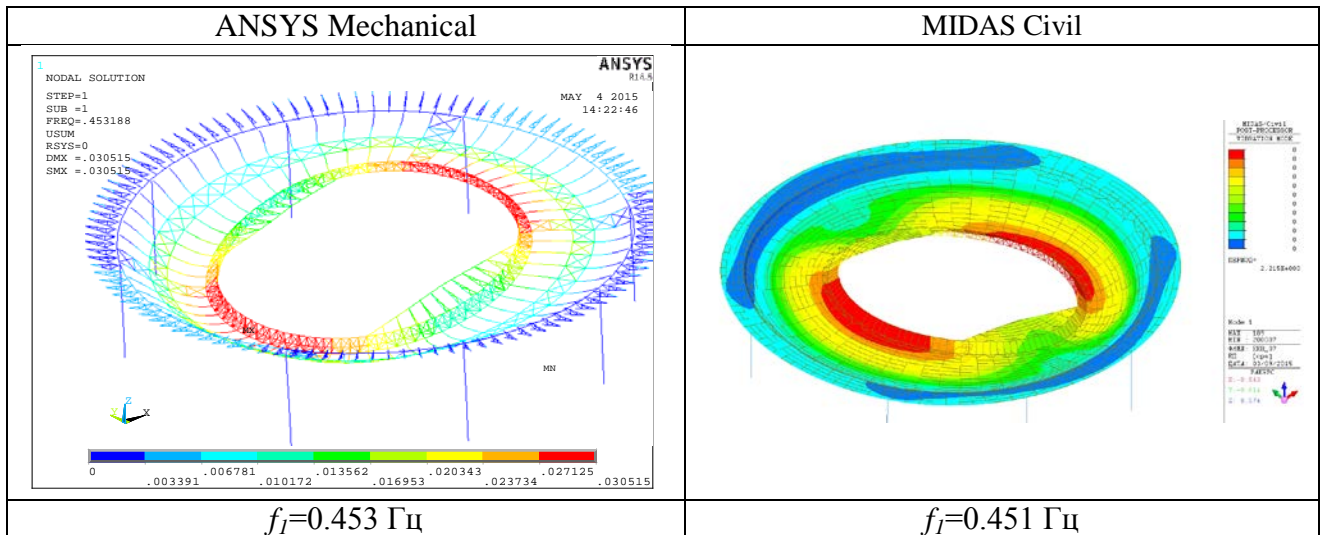


Рис.4.10.7. Сопоставление собственных частот и форм колебаний покрытия. Стадион в г. Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК MIDAS Civil.

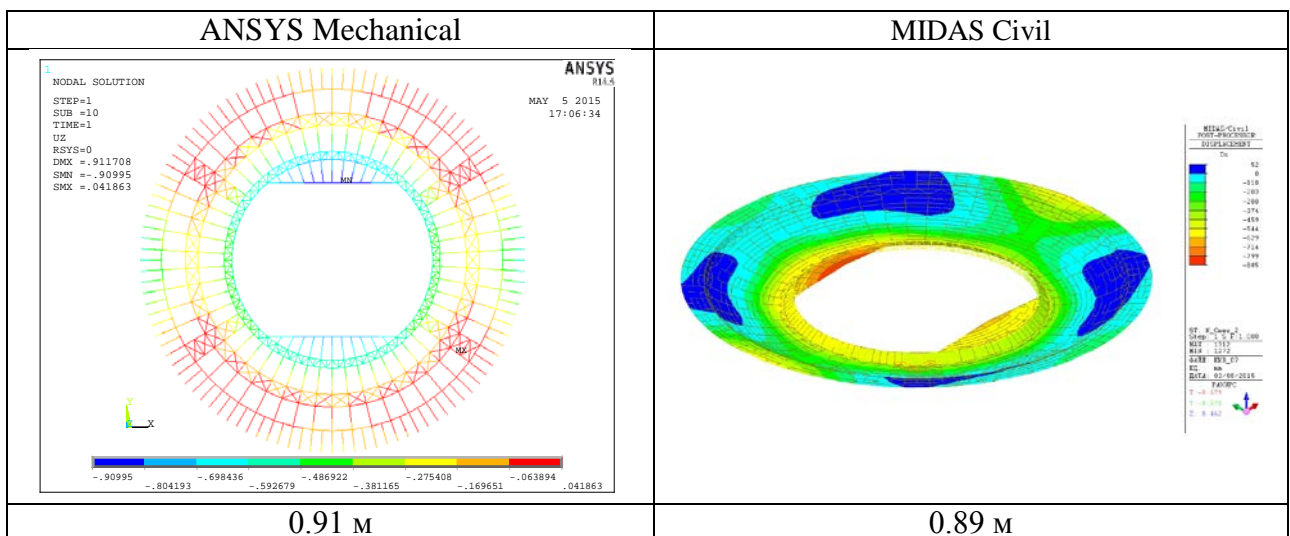


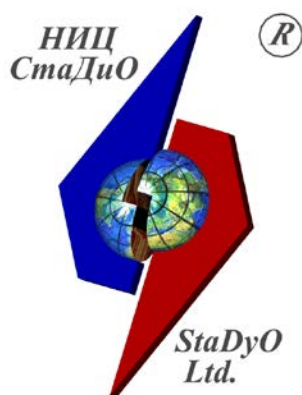
Рис.4.10.8. Сопоставление максимальных перемещений покрытия, м. Стадион в г. Екатеринбург. ПК ANSYS Mechanical и ПК MIDAS Civil.

4.11. Научно-техническое сопровождение прохождения в ФАУ «Главгосэкспертиза России» в части расчетного обоснования проектов упомянутых стадионов.

Научно-техническое сопровождение проекта уникального сооружения в ФАУ «Главгосэкспертиза России» (в части расчетного обоснования механической безопасности) включает ряд науко- и трудоемких работ, которые были успешно выполнены авторским коллективом:

- 1) Большая предварительная работа, в том числе, со смежниками-альтернативщиками, по достижению приемлемого соответствия основных результатов расчетов (см. выше)
- 2) Развернутые ответы на замечания и предложения штатных и приглашенных экспертов, в ряде случаев требующие серьезных дополнительных исследований;
- 3) Убеждение экспертов в достоверности полученных результатов с применением не столько научной аргументации, сколько глубокого знания российских и мировых нормативных основ проектирования и расчетов уникальных сооружений
- 4) Необходимость выполнения работ по пп.2.3 в сжатые сроки, обусловленные сроком действия договора на экспертизу проекта, при их необходимо высоком уровне.

По всем исходным и оптимизированным вариантам проектов стадионов к ЧМ 2018 (Самара, Нижний Новгород, Волгоград, Ростов-на-Дону, Екатеринбург) в итоге многоитерационного взаимодействия «расчетчик-эксперт» были получены положительные заключения ФАУ «Главгосэкспертиза России».



5. Заключение

1. Изложенные в настоящем описании и ряд других наукоемких проблем успешно решены авторским коллективом НИЦ СтаДиО в течение последних 5-и лет при расчетном обоснования НДС, прочности и устойчивости основания и несущих конструкций стадионов в Самаре, Волгограде, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону и Екатеринбурге при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий. Расчетные исследования выполнены по необходимости в сложных постановках с применением адекватных математических моделей и современных численных методов механики в верифицированных (в системе РААСН) программных комплексах.

2. В результате выполненного комплекса научно-исследовательских работ на новом уровне решена социально значимая и наукоемкая проблема обеспечения механической (конструктивной) безопасности уникальных комбинированных объектов строительства (трехмерных систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлоконструкции покрытия и фасадов»), имеющих современные архитектурные формы и конструктивные решения, предназначенных для проведения чемпионата мира по футболу 2018 года (режим FIFA) и для дальнейшего использования после него (режим «Наследие»).

3. Упомянутые результаты расчетных исследований и специально разрабатываемые, на базе рассмотренных проектных, адаптивные прогнозные математические (конечноэлементные) модели должны составить основу реализуемых систем мониторинга состояния несущих конструкций стадионов для всех стадий «жизненного» цикла.

4. Основные подходы, методики численного моделирования и результаты расчетных исследований легли в основу курса лекций и практических занятий для студентов, магистрантов и аспирантов ряда ведущих российских университетов (НИУ МГСУ, Пермский НИПУ, Томский ГАСУ, РУТ-МИИТ, ДВФУ и др.), разрабатываются в ряде кандидатских и докторских диссертаций, апробированы на международных конференциях и симпозиумах, опубликованы в ряде статей и монографий.

6. Благодарности

Авторский коллектив выражает искреннюю благодарность:

1) Сотрудникам НИЦ СтаДиО, вынужденно не включенным в авторский коллектив (из-за ограничения его численности по условиям конкурса), но внесшим свой значимый вклад в представленную «стадионную» тематику (С.В. Щербина, Ю.Н. Дядченко, А.Л. Потапенко и др.).

2) Заказчикам, генеральным проектировщикам стадионов:

– ООО «Проектный институт уникальных зданий сооружений «Арена» (ООО «ПИ «Арена») – ген. директор Е.Е. Бекмухамедов, гл. архитектор, академик РААСН Д.В. Буш, гл. инженер А.Д. Мухин, гл. конструктор М.Я. Лившин и др.;

– Федеральное государственное унитарное предприятие «Спорт-Инжиниринг» (ФГУП «Спорт-Ин»);

3) Коллегам-конструкторам, выполнявшим альтернативные расчеты и/или оптимизацию конструкций по нашим рекомендациям:

– ООО «Проектная группа «Максимум», г. Санкт-Петербург (ген. директор А.Ю. Кулешов);

– ООО «Стальпроект», г. Москва (ген. директор С.Ю. Лубенец, гл. инженер М.В. Тамбовцев и др.);

– ООО «Инфорспроект», г. Москва (ген. директор А.И. Шахворостов, зам. ген. директора Иващенко А.Н. и др.);

– ООО «СинараДевелопментПроект», г. Екатеринбург;

– ООО "Проектное Бюро "Техно-Парк", г. Екатеринбург (ген. директор Д.М. Аксельрод);

– ООО «БНК+», г. Волгоград (гл. инженер И.М. Долгилевич).

4) «Специалистам ФАУ «Главгосэкспертиза России» за обоснованную дотошность, не переходящую в мелочную придирчивость, при рассмотрении наших расчетных материалов и аргументации в полезных дискуссиях (Б.В. Ильичев, Е.В. Леонтьев, С.Ю. Ким, О.С. Щедрин)

5) И, наконец (last but not least), академику РААСН В.И. Травушу (приглашенному эксперту ФАУ «Главгосэкспертиза России») – за внимание, доброжелательную критику и конструктивные предложения, всегда приводившие к поиску и нахождению лучших решений коллективами конструкторов и расчетчиков.

7. Список литературы

1. Научно-технический отчет «Экспертные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости сооружения СОК с аквапарком „Трансвааль-парк“ с целью выявления и анализа причин его обрушения (6 этапов)». – М.: НИЦ СтаДиО, 2005.
2. Научно-технический отчет «Экспертные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния несущих конструкций ледового дворца спорта на Ходынском поле (Москва, Хорошевское шоссе, вл. 38)». – М.: НИЦ СтаДиО, 2005.
3. Научно-технический отчет «Экспертные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости металлоконструкций цеха № 1 (г. Можайск) с целью выявления и анализа причин его обрушения». – М.: НИЦ СтаДиО, 2007.
4. Научно-технический отчет «Экспертные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости здания Басманного рынка с целью выявления и анализа причин его обрушения (7 этапов)». – М.: НИЦ СтаДиО, 2007.
5. Научно-технический отчет «Уточненные расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих железобетонных и металлических конструкций Большой ледовой арены для хоккея с шайбой (г. Сочи, Олимпиада-2014) при действии статических, ветровых и сейсмических нагрузок». – М.: НИЦ СтаДиО, 2010.
6. Научно-технический отчет «Расчетные исследования трехмерного упруго-пластического напряженно-деформированного состояния узлов сопряжения ферм покрытия стадиона „Спартак“ (Москва, Тушино,...)». – М.: НИЦ СтаДиО, 2011.
7. Научно-технический отчет «Расчетные исследования пространственного напряженно-деформированного состояния и несущей способности металлоконструкций покрытия основного здания аэровокзального комплекса „Внуково-1“ (блока б), включая трехмерный физически нелинейный конечноэлементный анализ узлов сопряжения ферм». – М.: НИЦ СтаДиО, 2011.
8. Научно-технический отчет «Уточненные расчетные исследования ветровых и снеговых нагрузок, напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих железобетонных и металлических конструкций футбольного стадиона (г. Санкт-Петербург, Крестовский остров, Южная дорога, 25) при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий». – М.: НИЦ СтаДиО, 2011.
9. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта – «Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Самара, в границах ул. Московское шоссе, Ракитовское шоссе, Волжское шоссе, Ташкентская, Демократическая». – М.: НИЦ СтаДиО, 2013.
10. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций, при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта – «Строительство стадиона на 45 000 зрителей для проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года, г. Нижний Новгород». – М.: НИЦ СтаДиО, 2014.
11. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта – «Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 76». – М.: НИЦ СтаДиО, 2014.
12. Научно-технический отчет «Результаты научно-технического сопровождения проектирования надземной части по объекту: «Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Ростов-на-Дону, в левобережной зоне». – М.: НИЦ СтаДиО, 2014.
13. Научно-технический отчет «Научно-методическое сопровождение проектирования (стадия РД) Объекта – «Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская. ул. Самаркандская». – М.: НИЦ СтаДиО, 2015.

14. Научно-технический отчет «Научно-методическое сопровождение проектирования (стадия РД) Объекта – «Строительство стадиона на 45000 зрительских мест, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д.76» . – М.: НИЦ СтаДиО, 2015.
15. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций, при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта – «Проектирование и строительство стадиона с инфраструктурой в Екатеринбурге». – М.: НИЦ СтаДиО, 2015.
16. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий по откорректированной проектной документации Объекта – «Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская, ул. Самаркандская». – М.: НИЦ СтаДиО, 2016.
17. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированных несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта — «Стадион с инфраструктурой в г. Волгограде для проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года». – М.: НИЦ СтаДиО, 2016.
18. Научно-технический отчет «Расчетная оценка несущей способности трапециевидных железобетонных колонн с учетом выполненных СМР на объекте «Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д.76». – М.: НИЦ СтаДиО, 2016.
19. Научно-технический отчет «Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий по откорректированной проектной документации Объекта – „Строительство стадиона на 45 000 зрительских мест, г. Нижний Новгород, в квартале ул. Бетанкура, набережная р. Волги, ул. Должанская, ул. Самаркандская“». – М.: НИЦ СтаДиО, 2016.
20. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированного проекта несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий для объекта «Реконструкция и реставрация объекта культурного наследия «Стадион Центральный. Комплекс» вместимостью 35 000 зрительских мест, г. Екатеринбург, ул. Репина, д.5». – М.: НИЦ СтаДиО, 2017.
21. Научно-технический отчет «Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости оптимизированных несущих конструкций при нормативно регламентированных сочетаниях нагрузок и воздействий» для Объекта — «Стадион с инфраструктурой в г. Волгограде для проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года». – М.: НИЦ СтаДиО, 2017.
22. Белостоцкий А.М. Опыт расчетного обоснования состояния уникальных (высотных и большепролетных) зданий и сооружений // Высотные здания, 2014, №2/14, с. 106-109.
23. Белостоцкий А. М., Дубинский С. И., Пеньковой С. Б., Аул А. А., Павлов А. С., Афанасьева И. Н., Нагибович А. И., Островский К. И., Котов Ф. М., Петряшев С. О., Петряшев Н. О., Щербина С. В., Вершинин В. В., Расчетное обоснование нагрузок и воздействий, НДС, прочности и устойчивости уникальных конструкций, зданий и сооружений. Опыт 2011-2013 гг. // Труды. (Тезисы докладов). XXV Международная конференция «ВЕМ & FEM». – Санкт-Петербург, 2013г.
24. Белостоцкий А.М., Нагибович А.И., Дмитриев Д.С., Островский К.И., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Аул А.А., Щербина С.В., Особенности расчетов НДС, прочности и устойчивости конструкций футбольных стадионов к чемпионату мира 2018г. // Труды. (Тезисы докладов). V Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». – Иркутск, 2014г.
25. Белостоцкий А.М., Нагибович А.И., Дмитриев Д.С., Островский К.И., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Аул А.А., Щербина С.В. // Труды. (Тезисы докладов). XXVI Международная конференция “Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций». – Санкт-Петербург, 2015г.

26. Белостоцкий А.М., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Щербина С.В., Особенности расчетов НДС, прочности и устойчивости конструкций футбольных стадионов к чемпионату мира 2018г. // Труды. (Тезисы докладов). VI Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». – Владивосток, 2016г.

27. Белостоцкий А.М., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С., Дядченко Ю.Н., Щербина С.В., Особенности расчетов НДС, прочности и устойчивости конструкций футбольных стадионов к чемпионату мира 2018г. // Материалы доклада. 100+ Forum Russia. Международный форум и выставка высотного и уникального строительства. –Екатеринбург, 2017г.

28. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Под общей редакцией Белостоцкого А.М. и Акимова П.А. 2 тома.– М. АСВ, 2016г.

29. Белостоцкий А.М., Аул А.А., Нагибович А.И., Дмитриев Д.С. Особенности расчетов напряженно-деформированного состояния, динамики, прочности и устойчивости конструкций футбольных стадионов к Чемпионату мира 2018 года. // Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. – М. АСВ, 2016г.