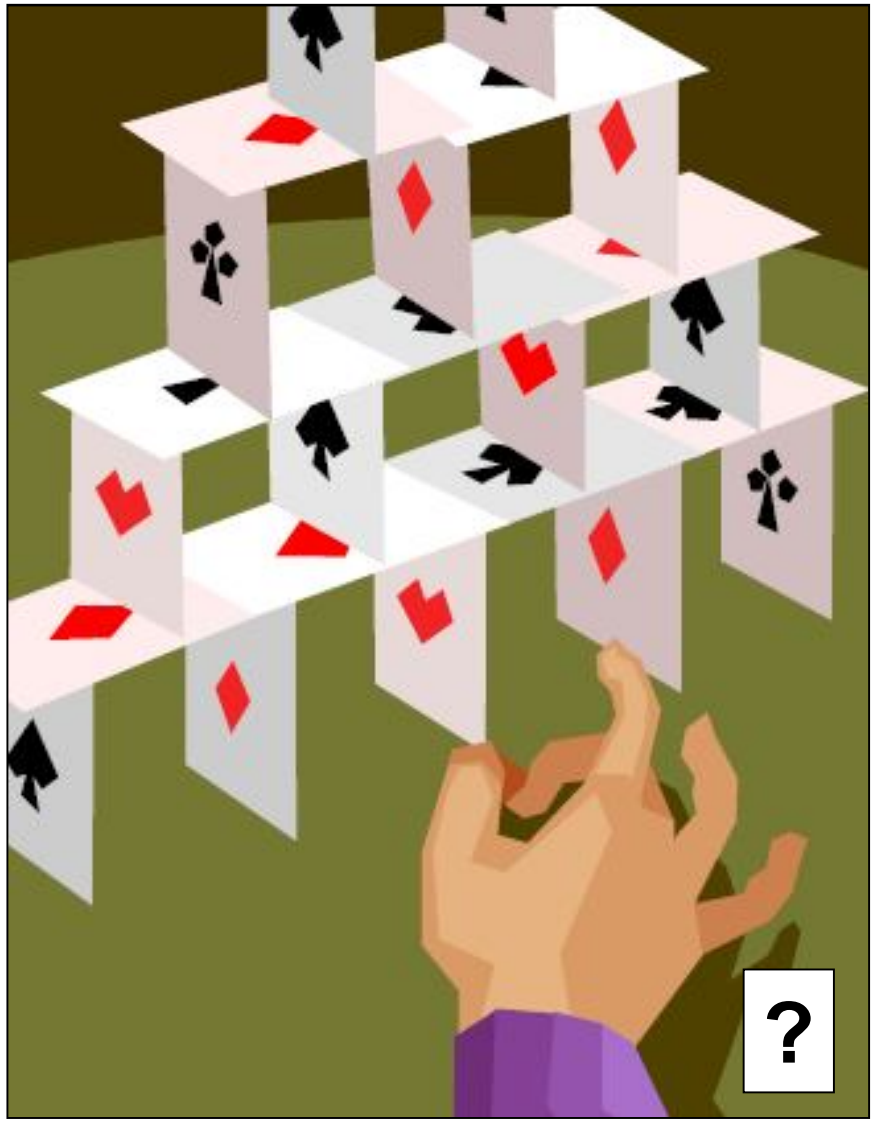
Часть 1

ЦНИИПСК им.Мельникова с 1880 года | stako



СЕМИНАР

Учёт чрезвычайных ситуаций при проектировании строительных конструкций

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ

на примере расчёта большепролетных металлических покрытий на живучесть в нелинейной динамической постановке

Докладчик: конструктор **Дробот Д.Ю.**

Рассмотрим два большепролетных металлических покрытия

Крытый Конькобежный Центр в Крылатском (Москва)

Ледовый дворец на Ходынском поле (Москва)

План семинара:

1. Конструктивная схема. Особенности статической работы

2. Узлы

3. Фотографии

4. Причина рассмотрения

5. **Расчет на повреждения с позиции не только ученого-теоретика, но и инженера-практика**

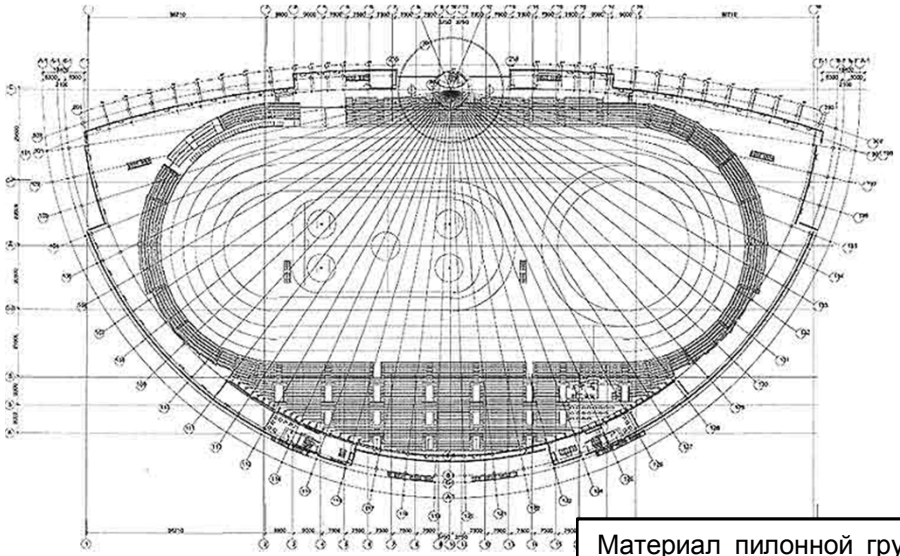
Рассмотрим первое покрытие. Вначале проанализируем покрытие на момент аварии (до усиления), затем усиленный вариант…

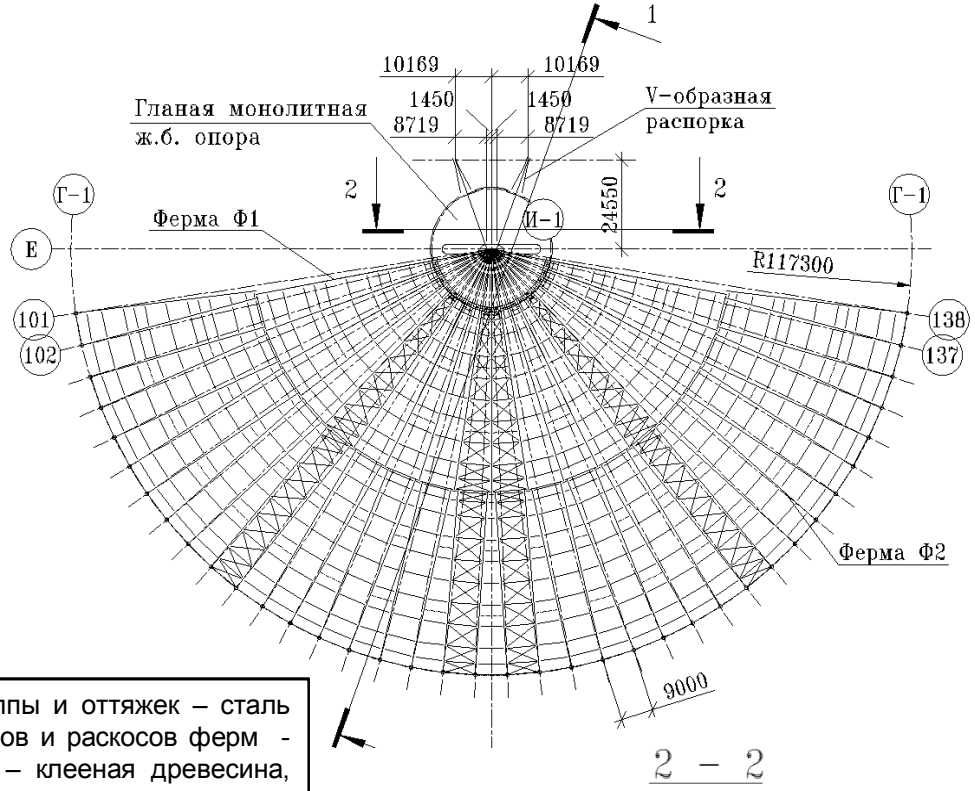
Принципиальная особенность данного покрытия – нулевая потенциальная живучесть…

Крытый конькобежный центр в Крылатском

Конструктивная схема расположения элементов покрытия. Статическая работа

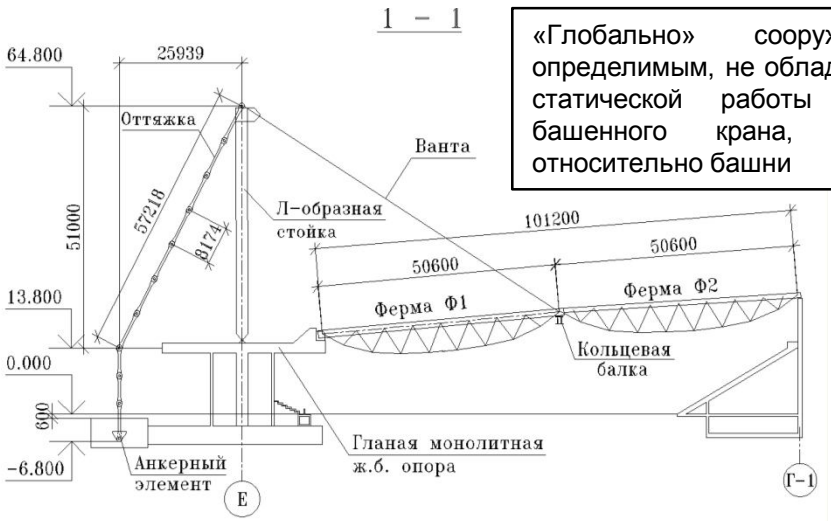
площадь ледовой арены – **12 700** кв м,
вместимость трибун – **10** тыс человек

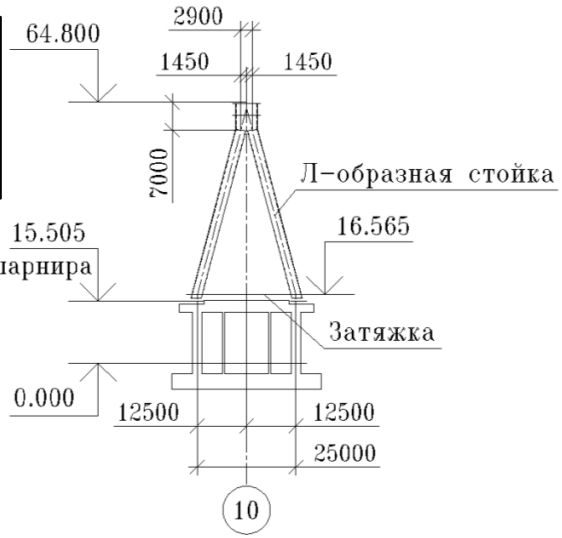




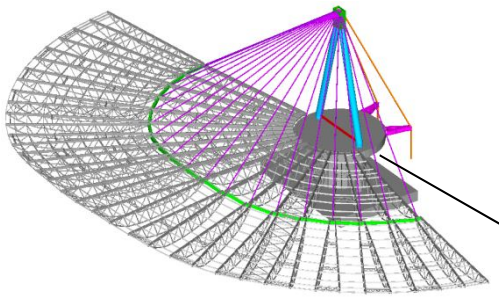
Материал пилонной группы и оттяжек – сталь класса С390, нижн. поясов и раскосов ферм - Ст20, верх. пояс ферм – клееная древесина, кольцевой балки С345-3.

«Глобально» сооружение является статически-определимым, не обладает никакой связностью. По схеме статической работы напоминает работу обычного башенного крана, радиально «раскопированного» относительно башни

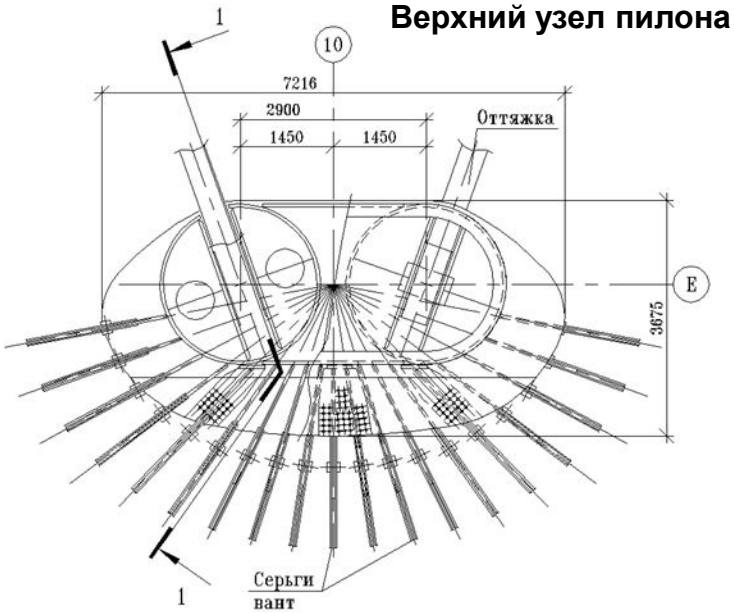


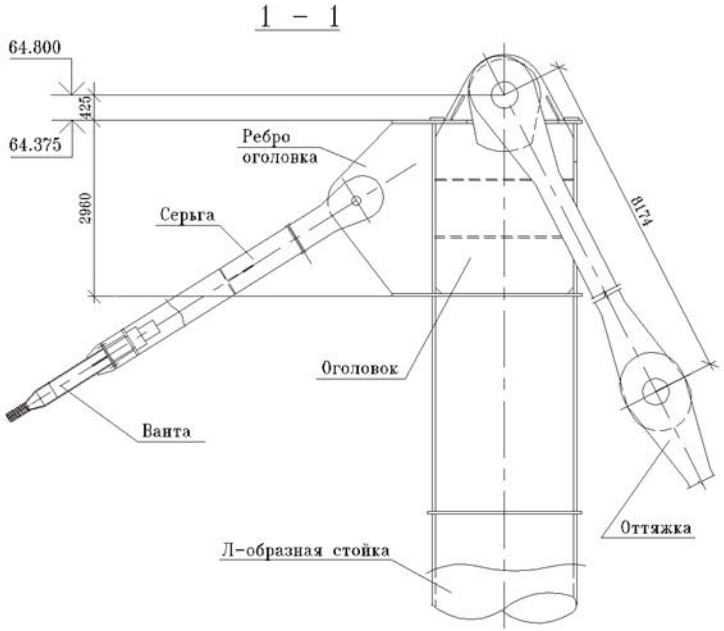


Узлы



Верхний узел пилона





Нижний (опорный) узел пилона

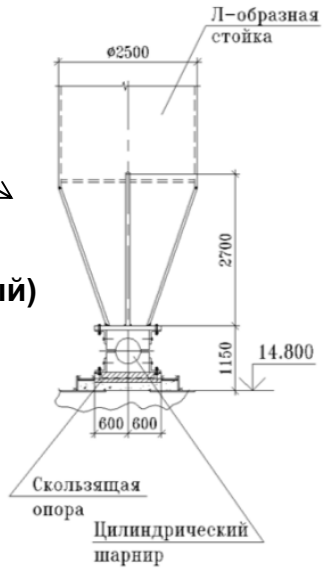
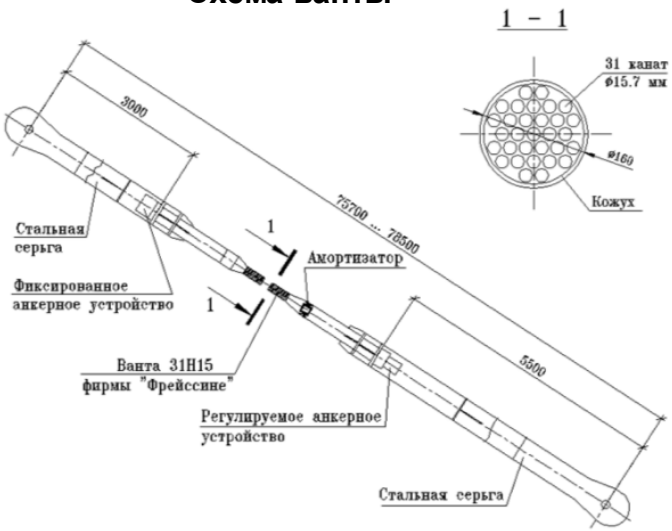
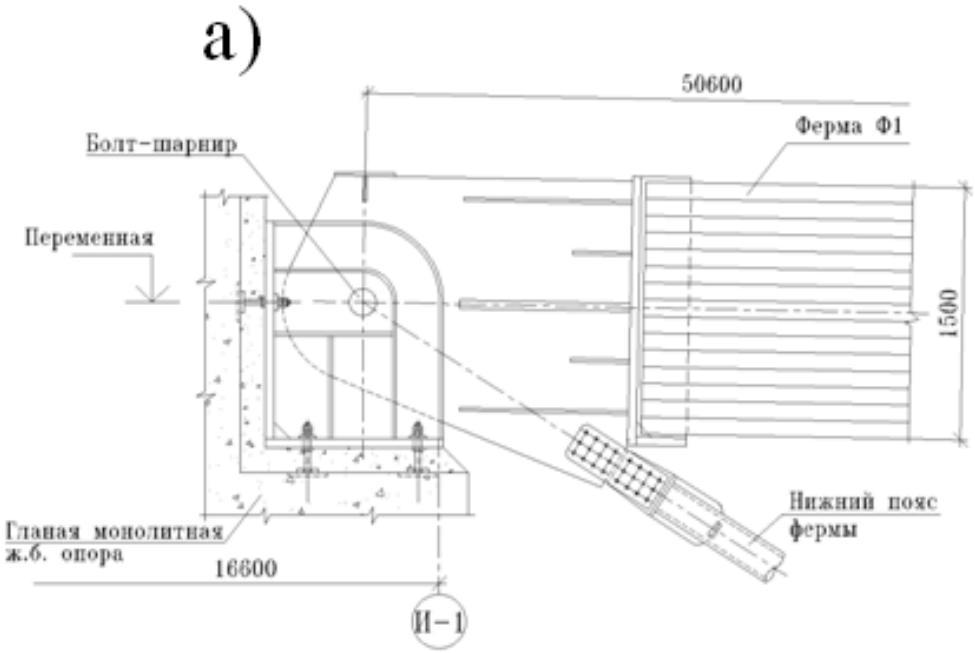


Схема ванты





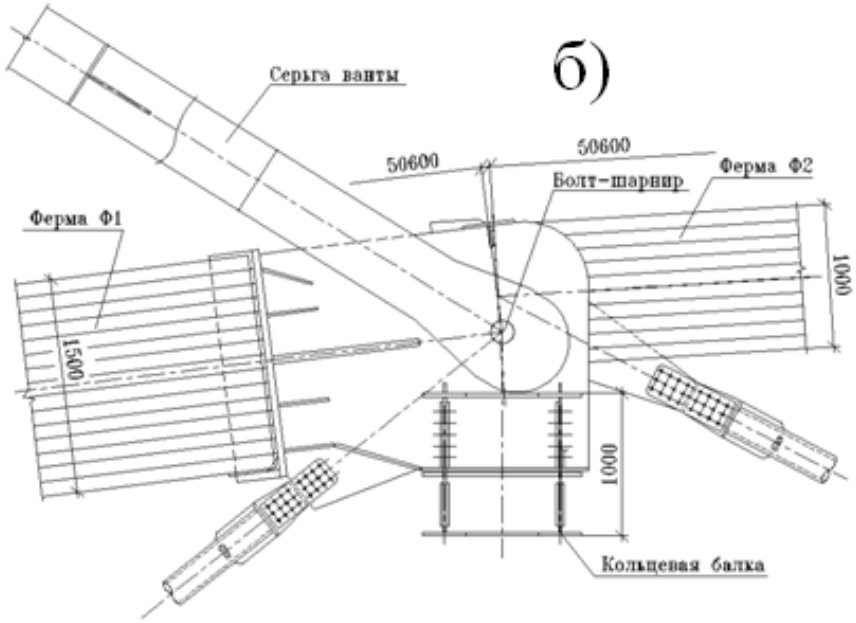
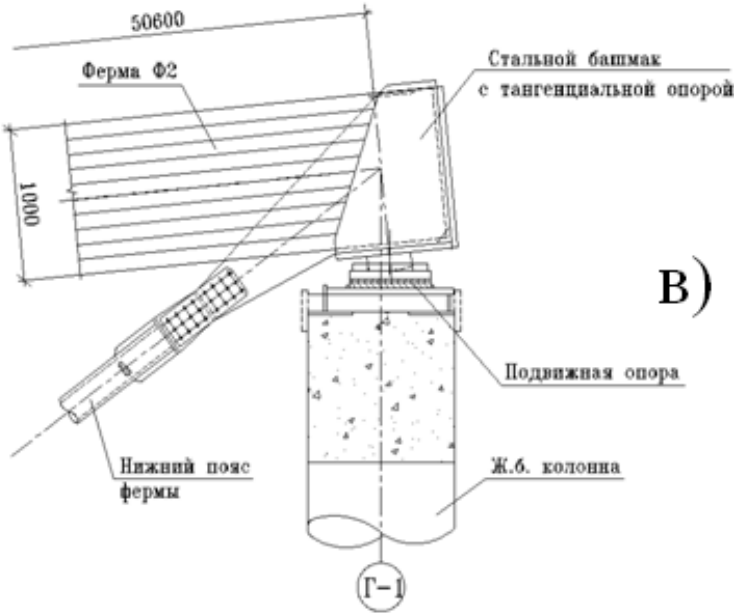
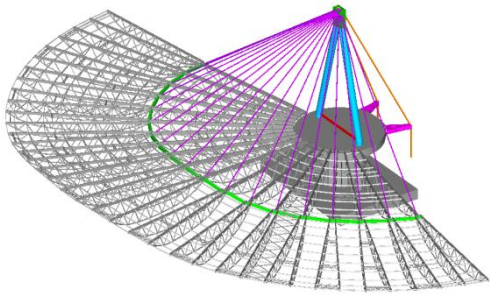


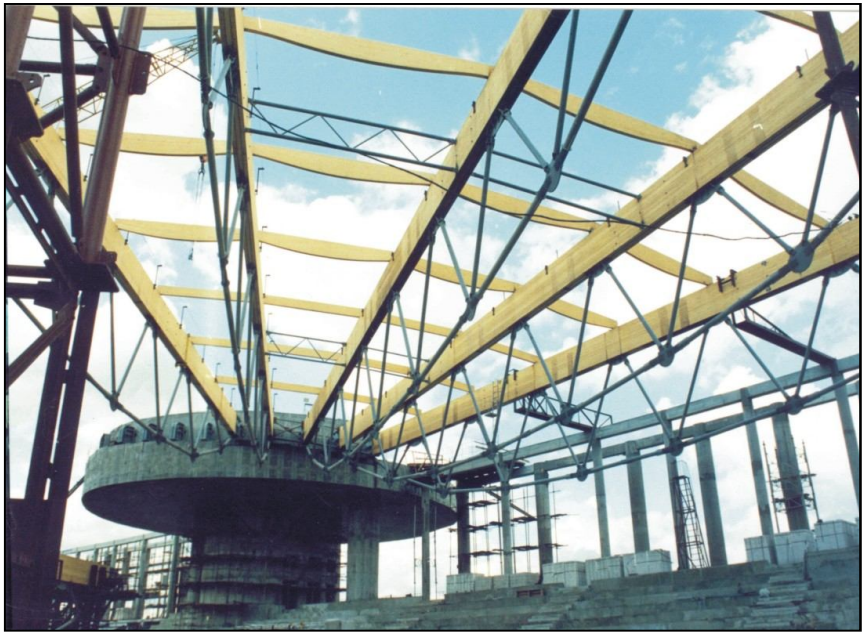
Рисунок 3.5. – Конструктивные узлы:
а) опирание фермы Ф1 на главную железобетонную опору; б) подвеска фермы Ф1 к ванте; в) опирание фермы Ф2 на железобетонную колонну



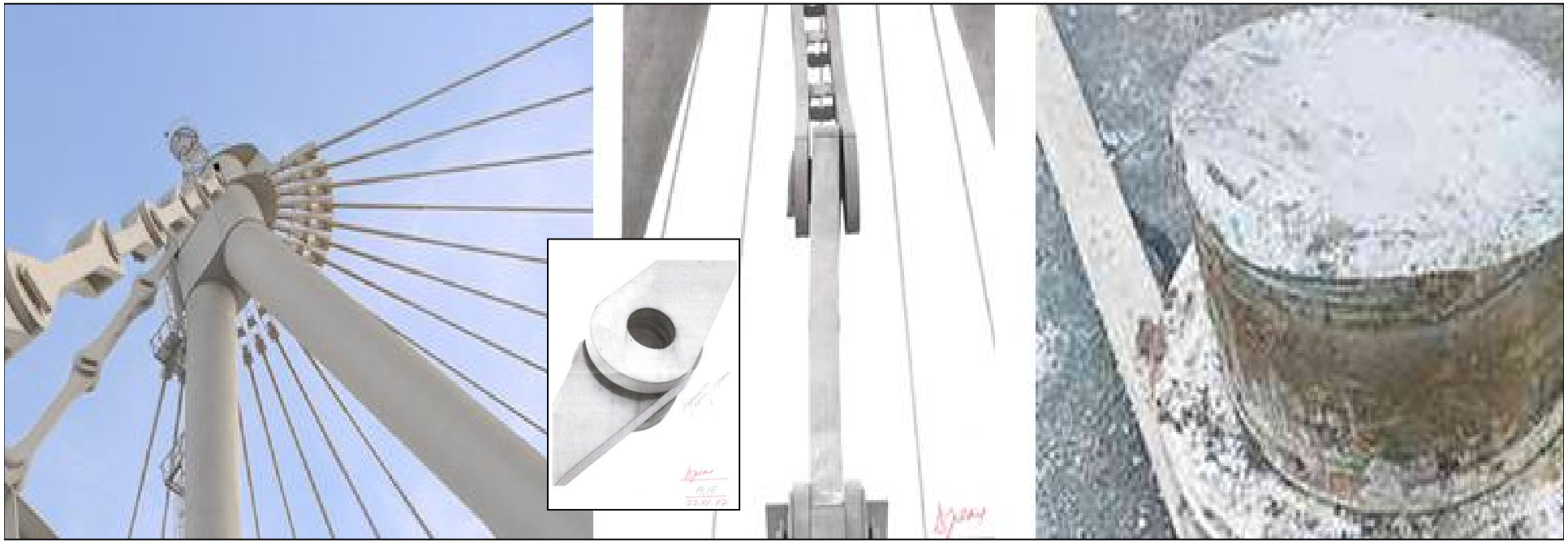


Фотографии

Фотографии



Причина рассмотрения сооружения: ККЦ – сооружение с **нулевой** живучестью



Поврежденная оттяжка **Выпавший обломок втулки**

04.2003 – начало проектирования сооружения;

2004 г. – заключение МГСУ от нулевой живучести сооружения;

09.2004 – объект сдан в эксплуатацию;

11.2007 – авария (отказ «пальца» оттяжки).

Две основных версии причины аварии:

- брака в изготовлении силового «пальца» (втулки);
- ошибки проектирования: выбор материала для изготовления «пальцев», выбор опасной конструктивной формы.

Восстановительные работы

Рекомендуемый порядок анализа реакции сооружения на повреждения:

От простого к сложному

1. Предварительный логико-топологический анализ конструктивной формы в контексте ее **потенциальной стойкости** к повреждениям

2. Изменение частот и форм, потенциальной энергии деформаций, форм потери устойчивости и пр. при различных повреждениях

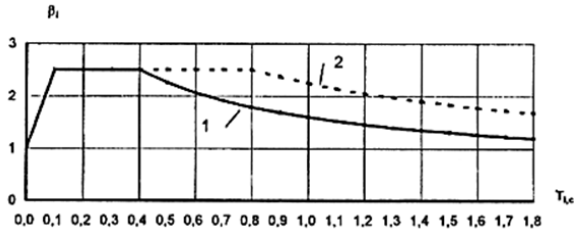
3. Отклик сооружения при повреждениях в нелинейной (геом., физ). статической постановке (возможно квазистатический расчет)

4. Отклик на повреждения в нелинейной динамической постановке

Может быть полезно:
-для «прочувствования» расчетчиком интегральной жесткости (не)поврежденного сооружения;
- формы и частоты колебаний – базис для последующих динамических расчетов;
- **получаются сравнительные характеристики степени повреждения**
- для установки критериев оценки повреждений при мониторинге и т.д.

Проще и быстрее. При использовании единого динамического коэффициента могут не выявиться наиболее худшие результаты (например, «динамический» удар)

?



Шаг 1-й. Выполняем предварительный логико-топологический анализ с учетом отказов

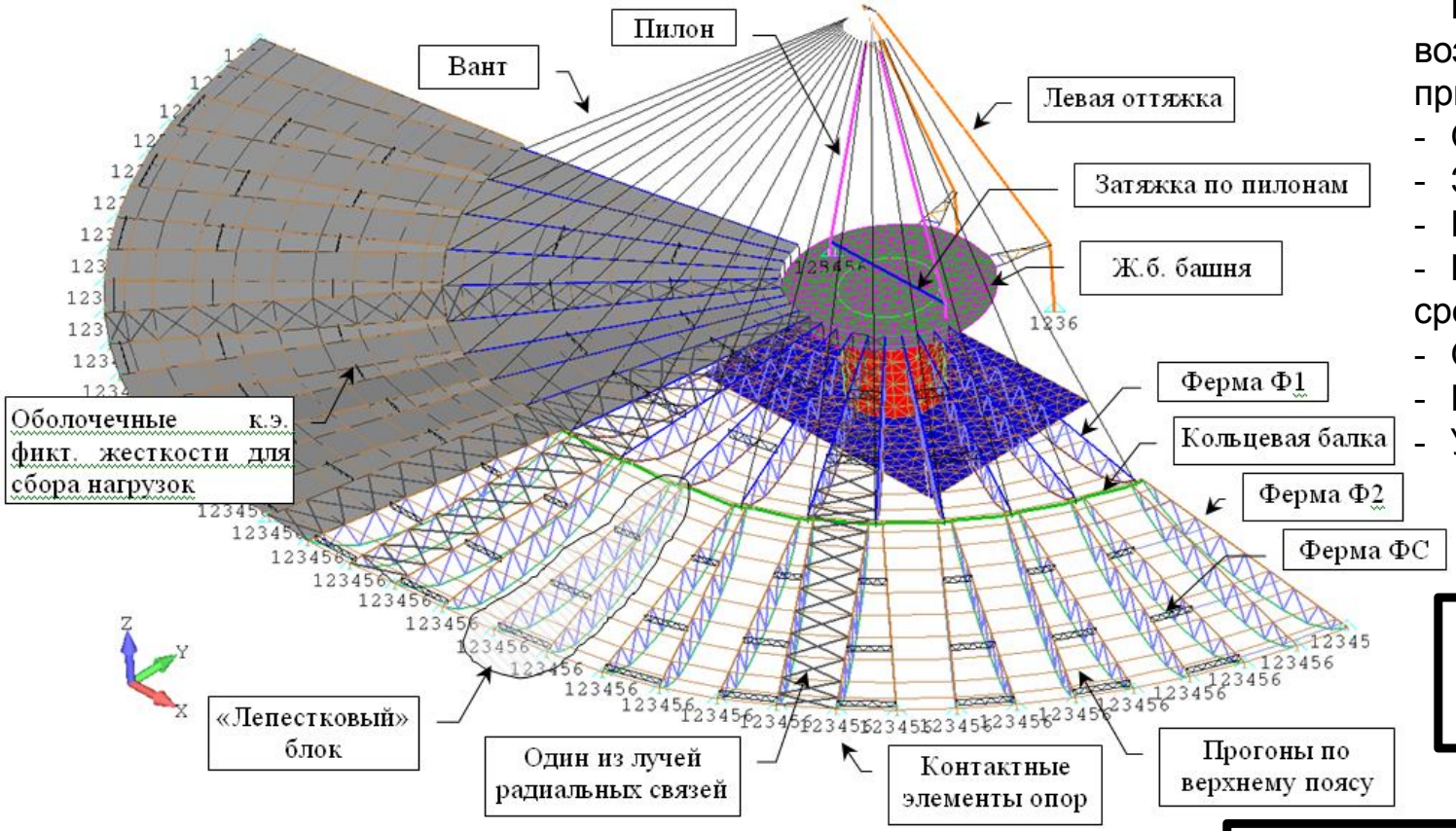


Рисунок 3.11. – Фрагмент расчетной модели сооружения

Проанализируем возможные последствия при различных отказах:
- Оттяжки,
- Затяжки,
- Ноги пилона,
- Ванта (крайний, средний),
- Опорного узла пилона,
- Кольцевой балки,
- Узлов ферм, связей.

Данное покрытие в целом является дискретным

Покрытие без последовавшего за аварией усиления.

<u>Покрытие до усиления (на момент аварии)</u>. С позиции системного анализа несущие конструкции ККЦ можно рассматривать как дискретную систему, состоящую из **четырех** взаимосвязанных частей:

- Первая часть включает образующие поверхность диска покрытия радиальные элементы (фермы, связи по верхним поясам ферм, прогоны с уложенным по ним профнастилом) и кольцевую балку;
- Вторая включает все 19 вант;
- Третья включает опорную ж.б. башню;
- Четвертая включает Л-образный пилон, состоящий из двух ног с затяжкой понизу, и две оттяжки с элементами упоров в ж.б. башню.

Интересно проанализировать как «эволюционировала» конструктивная форма на стадии «Проект»…

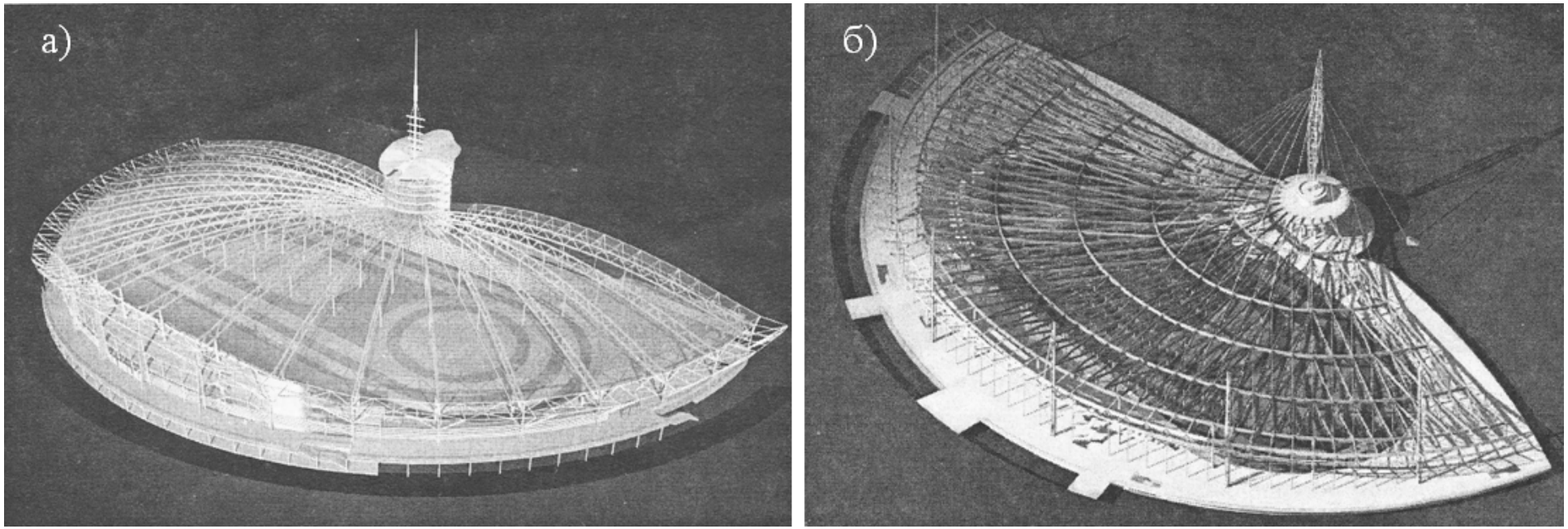
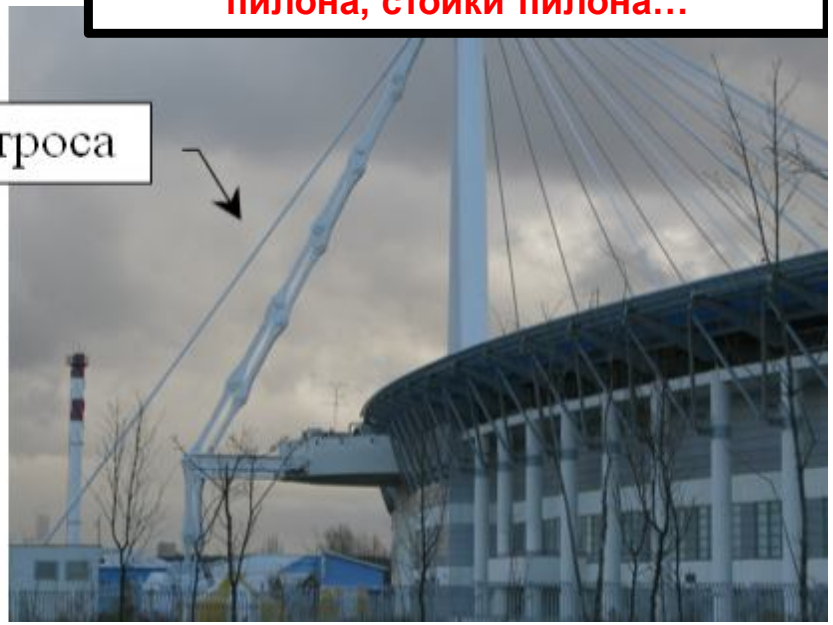


Рисунок – Эволюция несущих конструкций покрытия на стадии «П»:
а) первый вариант с арочными стальными фермами с затяжками;
б) второй вариант с центральным пилоном и шестью опорами

Усиление после аварии: ККЦ – осталось сооружением с **нулевой** живучестью

Остался не усиленным верхний узел пилона, стойки пилона…



Ремонт состоял из следующих основных этапов:

- Установки по периметру кольцевой балки временных опор для разгрузки оттяжек;
- Установки на поврежденное звено оттяжки временного страхующего устройства;
- Замены поврежденного пальца;
- Установки двух новых постоянных тросов, разгружающих и топологически дублирующих оттяжки;
- Усиления кольцевой балки;
- Выполнения горизонтальных упоров в опорной ж.б. башне.

Создание и отладка математической модели

В качестве примера моделирования аварийной ситуации рассмотрим самое «интересное» повреждение – отказ левой оттяжки…

При этом помимо «привычных» идеализаций для расчетных схем будет введено большое количество допущений, гипотез, упрощений и условностей, характерных для расчета на повреждения – о чем далее…

Шаг 2-й. Определяем комбинации нагрузок для расчета на живучесть

Таблица 3.1. – Интенсивность нагрузок на покрытие

Вид нагрузки	Норм. нагрузка g^n (кгс/м²)	Коэф. надёжн. по нагрузке γ_f	Расчётная нагрузка g (кгс/м²)
Изолирующие слои покрытия	68	1,1	76
Технологическая	20	1,2	24
Суммарная нагрузка (**летний** вариант)	**88**	1,14	**100**
Снеговая	125	1,43	180
Суммарная нагрузка (**зимний** вариант)	**213**	1,31	**280**

Основной вопрос – какие выбрать внешние нагрузки, сопутствующих тестовому повреждению ?

В качестве нагрузок для расчета на отказы составляем комбинацию из **постоянных, длительных нормативной интенсивности**.

Ветровую нагрузку не рассматриваем… в целом вопрос ее учета это дискуссионный вопрос – есть версия, что именно она привела к дополнительным усилиям в пальце.

Для снеговой нагрузки выбираем вариант 2, как дающий «наиболее» невыгодное распределение усилий в оттяжках (перекос).

Выделим две комбинации нагрузок со следующей интенсивностью:

- комбинация № 1 для расчета по предельным состояниям 1-й группы и сравнения математических моделей

$$(76 + 24 + 180 \cdot (1{,}2 \text{ или } 0{,}8)) \cdot 1{,}1 \approx \mathbf{350\ (270)}\ \text{кгс/м}^2;$$

- комбинация № 2 для расчета на живучесть

$$(68 + 20 + 125 \cdot 0{,}5 \cdot (1{,}2 \text{ или } 0{,}8)) \approx \mathbf{163\ (138)}\ \text{кгс/м}^2.$$

На правую или левую часть покрытия

Практически в два раза меньше, чем в комбинации 1, т.е. при расчетных нагрузках

«0.5» - учет **пониженного значения** для снеговой нагрузки

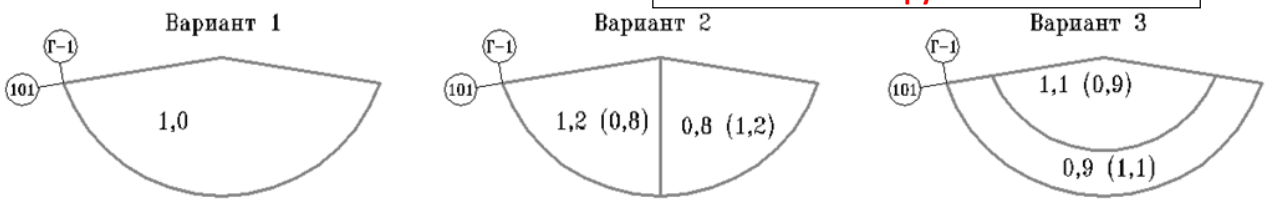


Рисунок 3.16. – Схемы распределения неравномерных «снегоотложений» и значения коэффициентов μ **(СпецТУ ЦНИИСК)**

К вопросу о кратковременных нагрузках при расчете на живучесть, на примере ветра

Основной вопрос – выбор внешних нагрузок, сопутствующих <u>тестовому</u> повреждению ?

Нормы США рекомендуют в таких случаях брать **20…30 % нормативной** величины ветровой нагрузки

Но в то же время отказ может произойти как раз при **расчетном значении** ветра, а еще более вероятно – при проявлении **пульсационной** составляющей

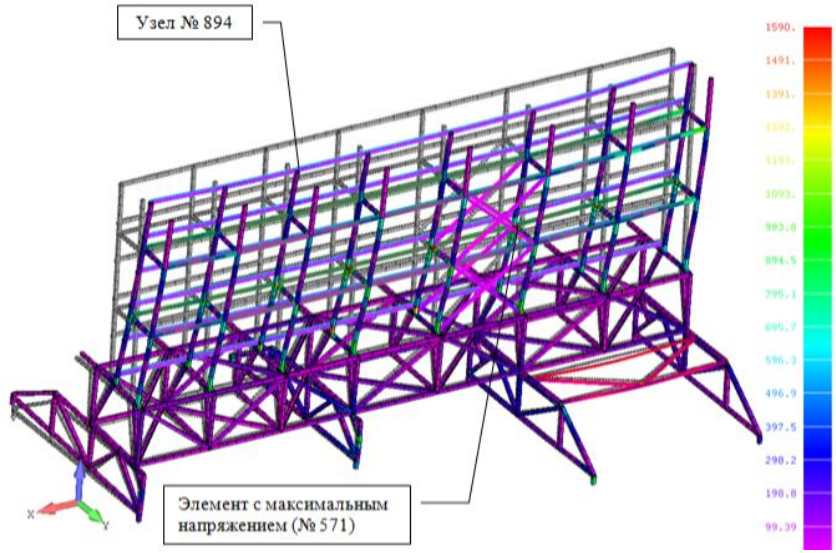
Что интересно, для сейсмического воздействия (как воздействия повреждающего вида) берутся следующие коэффициенты сочетания для **расчетных** нагрузок:

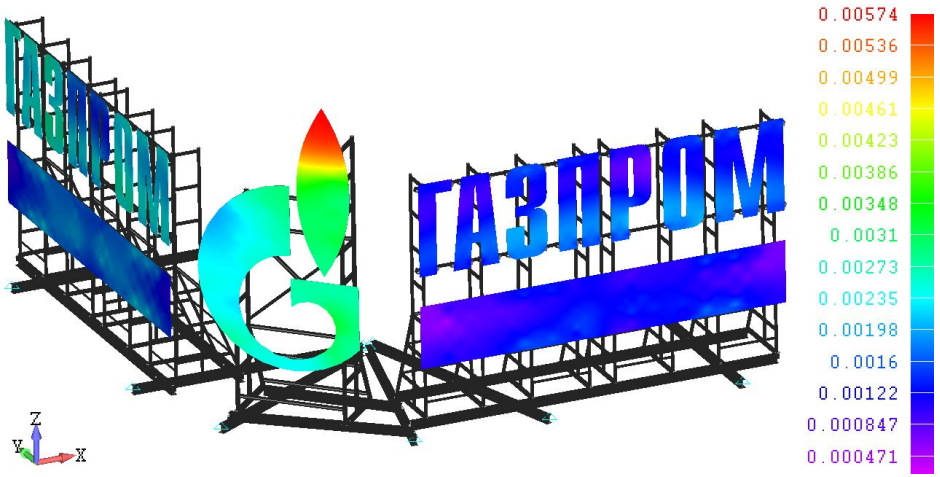
0.9 – для постоянных нагрузок

0.8 – для временных длительных

0.5 – для временных кратковременных

2.2. Результаты расчётов при отказе в 1-ой точке.





Основной вопрос – критерий живучести?

Чего мы «хотим» от поврежденной конструкции в момент реакции на повреждение, после повреждения?

1. **Живучесть – свойство системы выполнять свое функциональное назначение при наличии повреждений.**

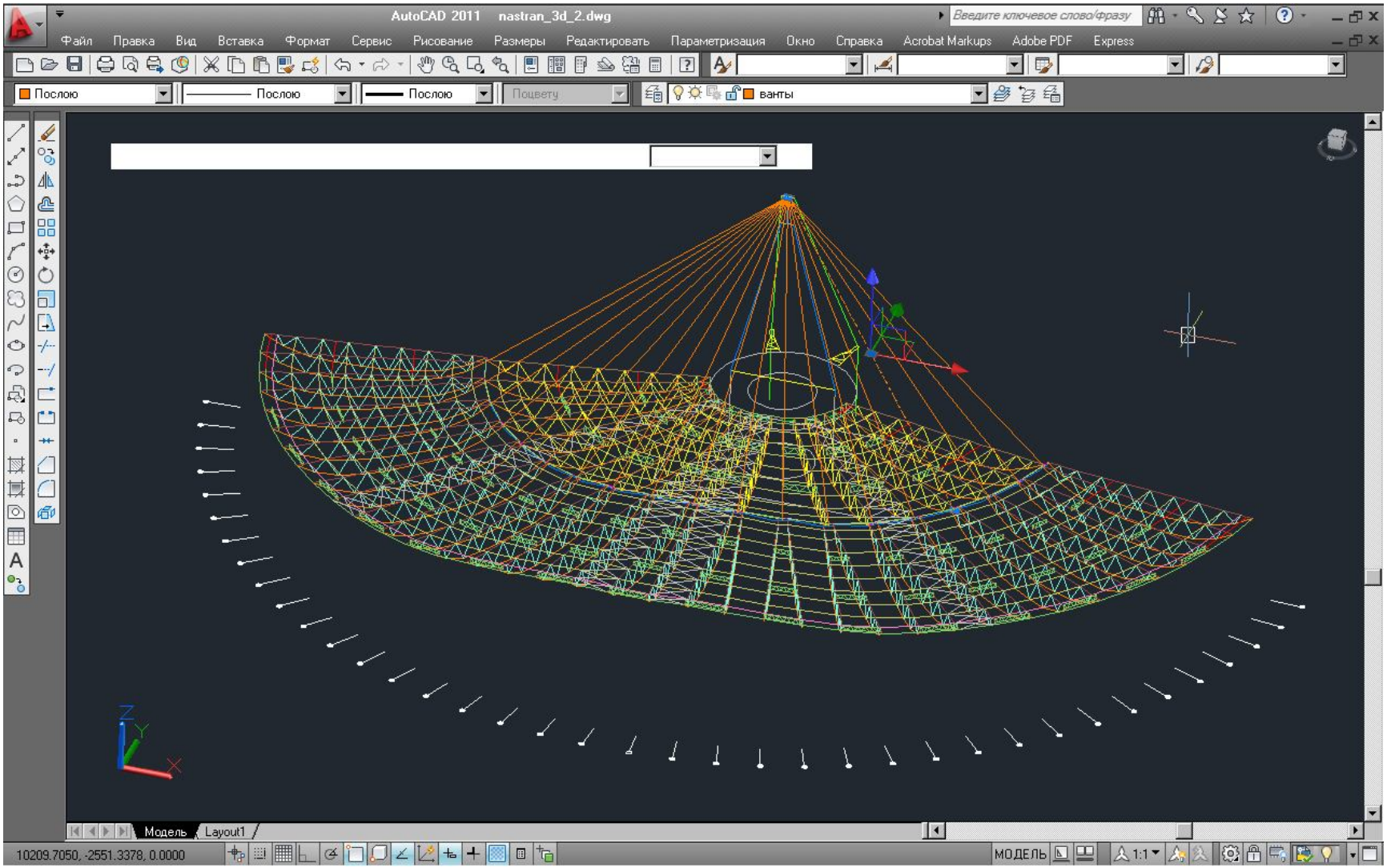
2. **Ограничение деформаций? Напряжений? Временной критерий (аналог – проблема огнестойкости)? Ограничение величины повреждений (аналог, сохранение некоторого жесткого остова при проблеме сейсмостойкости)? Ремонтопригодность?...**

3. **Понятия надежности, живучести, устойчивости функционирования, конструктивной безопасности, механической безопасности. Взаимосвязь и различия.**

Существует много спорных и дискуссионных вопросов. Например:

1. **Какой уровень стойкости обеспечивать для конструкции: отказ одного элемента, узла или нескольких элементов, узлов?**
2. **…**
3. **…**

Шаг 3-й. В среде AutoCAD создаем геометрическую модель

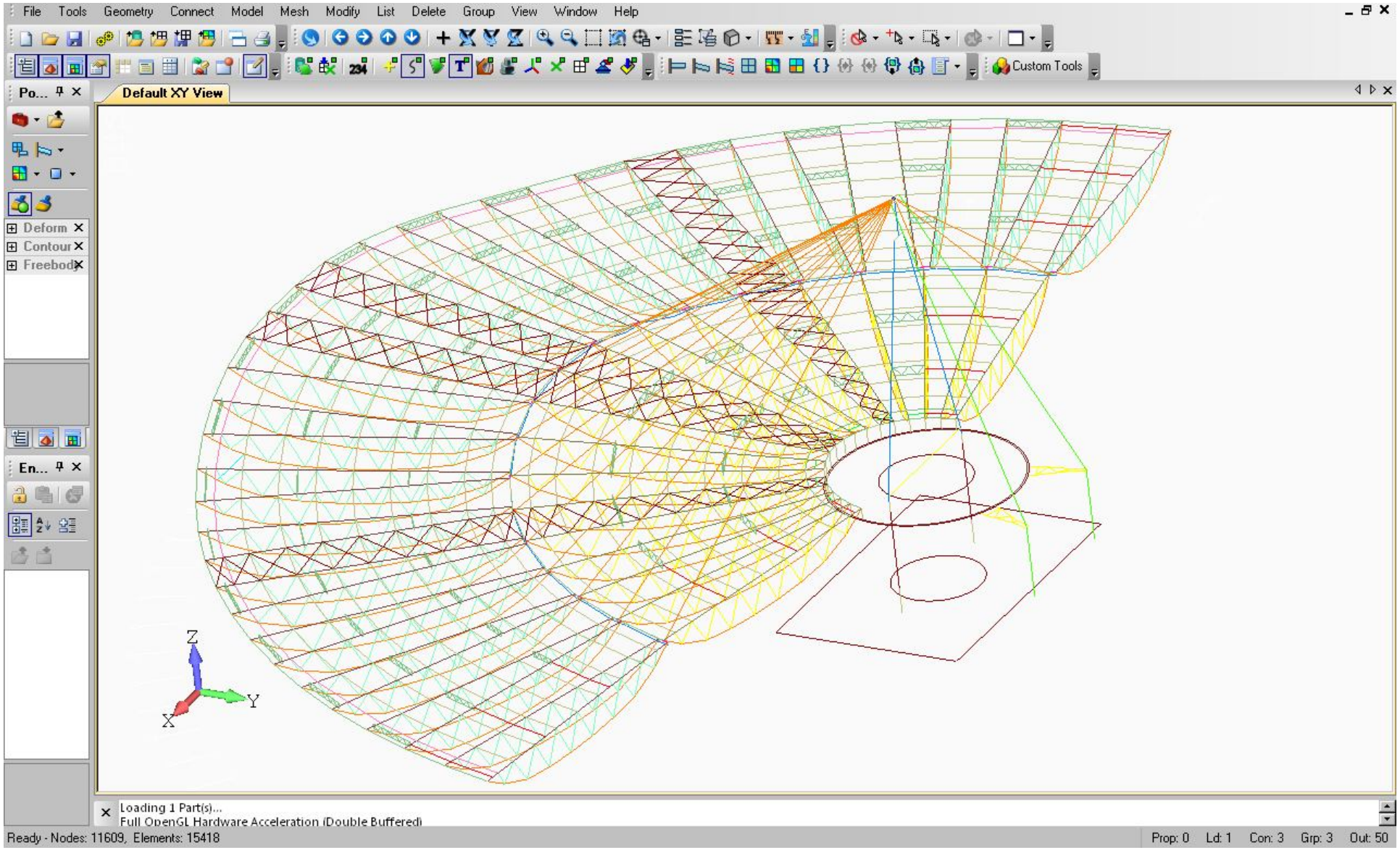


- Желательно заранее каждому типу жесткости сделать свой слой с определенным цветом;

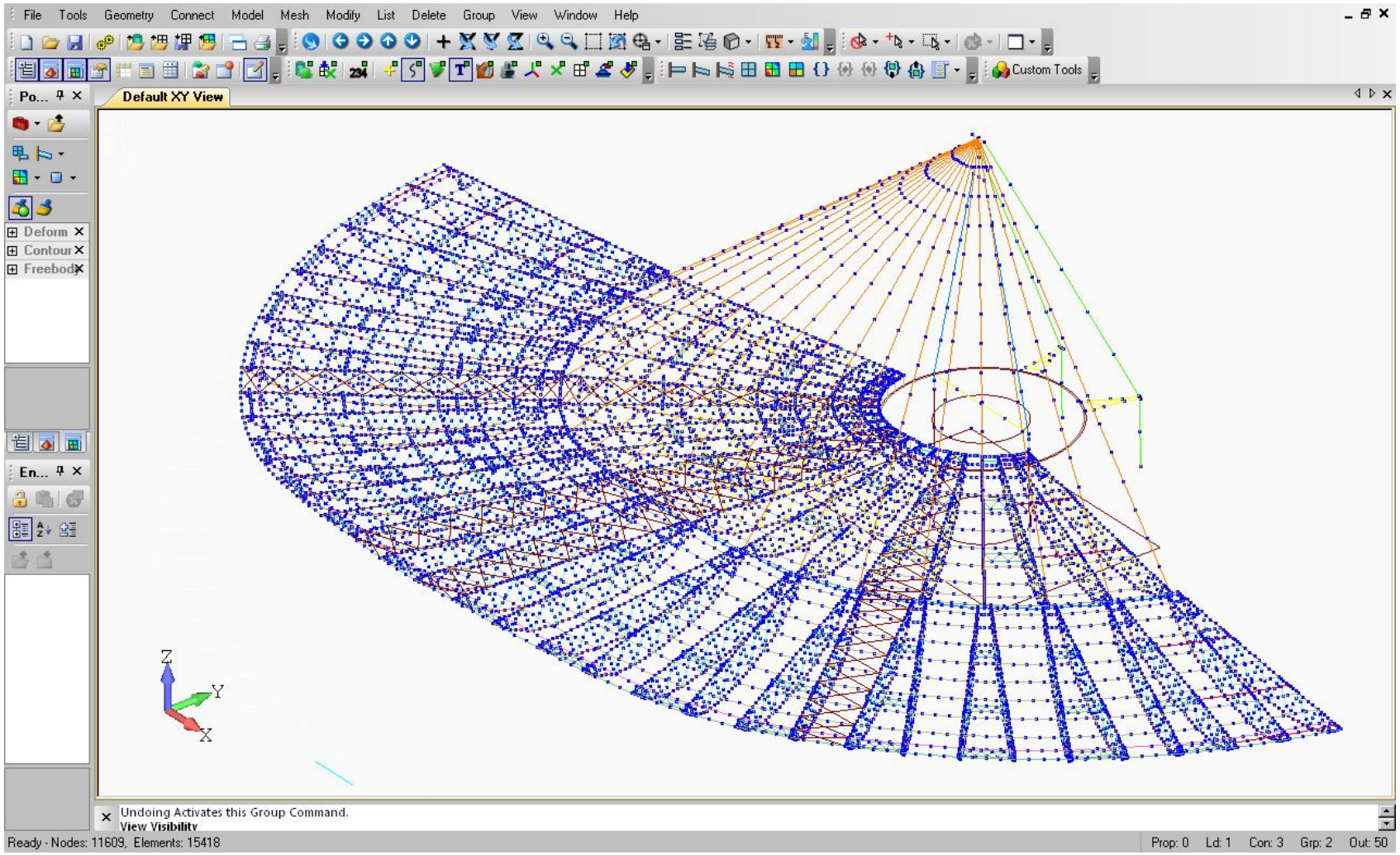
Шаг 4-й. Импортируем геометрию модели через dxf файл в расчетную программу

Какой расчетный комплекс выбрать?

Ответ: в котором есть модуль динамических расчетов с учетом физ., геом., конструктивной нелинейностей и т.п. Например, ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, LS-DYNA и т.д.



Шаг 5-й. Задаем условия разбиения конечно-элементной сетки



- В нелинейных расчетах желательно для линейно-протяженного конструктивного элемента (пояса, раскосы ферм, ванты, оттяжки и т.д.) – задать условие, при котором количество конечных элементов по длине будет не менее **6-8 шт.**

Шаг 6-й. Определяем физико-механические характеристики материалов

В математической модели в основном используются следующие единицы измерений:

- см – для линейных размеров и их производных;
- кгс – для нагрузок, усилий и их производных;
- кгс·сек^2/см^4 – для плотности материала.

База данных о физических характеристиках конструкционных материалов формировалась следующим образом. Для стали ферм, пилона, затяжки в пилоне, распорок и прогонов:

$E = 2{,}1 \cdot 10^6$ кгс/см^2 – модуль упругости,

$\nu = 0{,}3$ – коэффициент Пуассона,

$\rho = c \cdot \gamma / g = 1{,}2 \cdot 7{,}85 \cdot 10^{-3} / 981 = 9{,}6 \cdot 10^{-6}$ кгс·с^2/см^4 – плотность,

где $c = 1{,}2$ – строительный коэффициент,

$\gamma = 7{,}85 \cdot 10^{-3}$ кгс/см^3 – объёмный вес стали, $g = 981$ см/с^2 – ускорение свободного падения.

Для стали вант:	Древесина (верх. пояса ферм, прогоны):
$E = 1{,}95 \cdot 10^6$ кгс/см^2,	$E = 8{,}0 \cdot 10^4$ кгс/см^2,
$\nu = 0{,}3$,	$\nu = 0{,}49$,
$\rho = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ кгс·с^2/см^4.	$\rho = 7{,}3 \cdot 10^{-7}$ кгс·с^2/см^4.

Для бетона:

$E_{b,\tau} = 1{,}56 \cdot 10^5$ кгс/см^2,

$\nu = 0{,}2$,

$\rho = c \cdot \gamma / g = 1{,}1 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} / 981 = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ кгс·с^2/см^4.

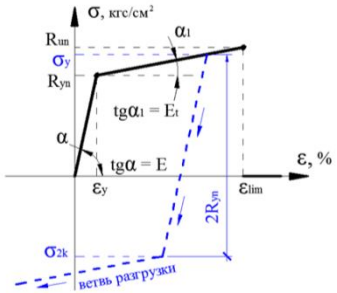


Рисунок 3.13. – Диаграмма работы материалов с кинематической моделью упрочнения (условно показана первая четверть)

Определяем физико-механические характеристики материалов, которые позднее будут заданы в расчетной модели.

<u>«Классические»:</u>

-Модуль упругости,

- плотность.

<u>«Дополнительные»:</u>

- предел текучести,

- предел прочности,

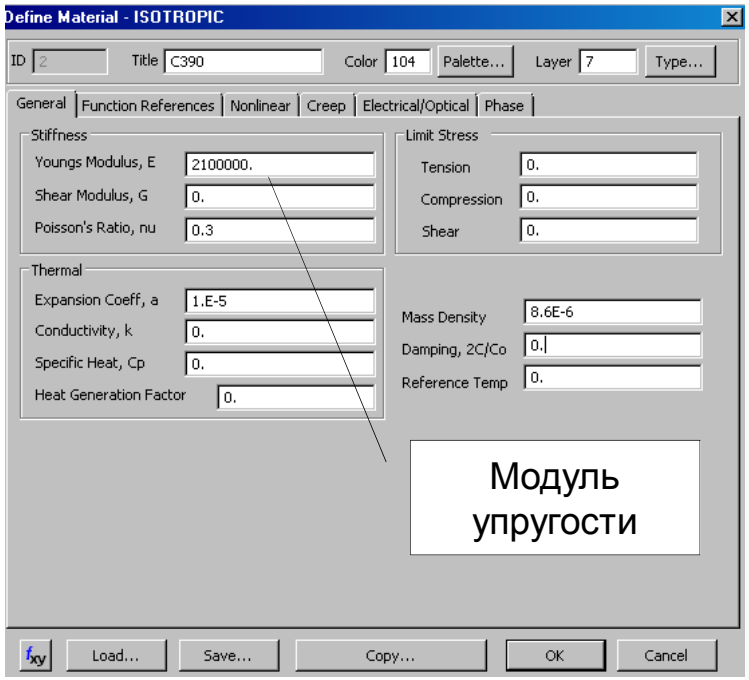
- предельная величина относительной пластической деформации (с запасом 20%)

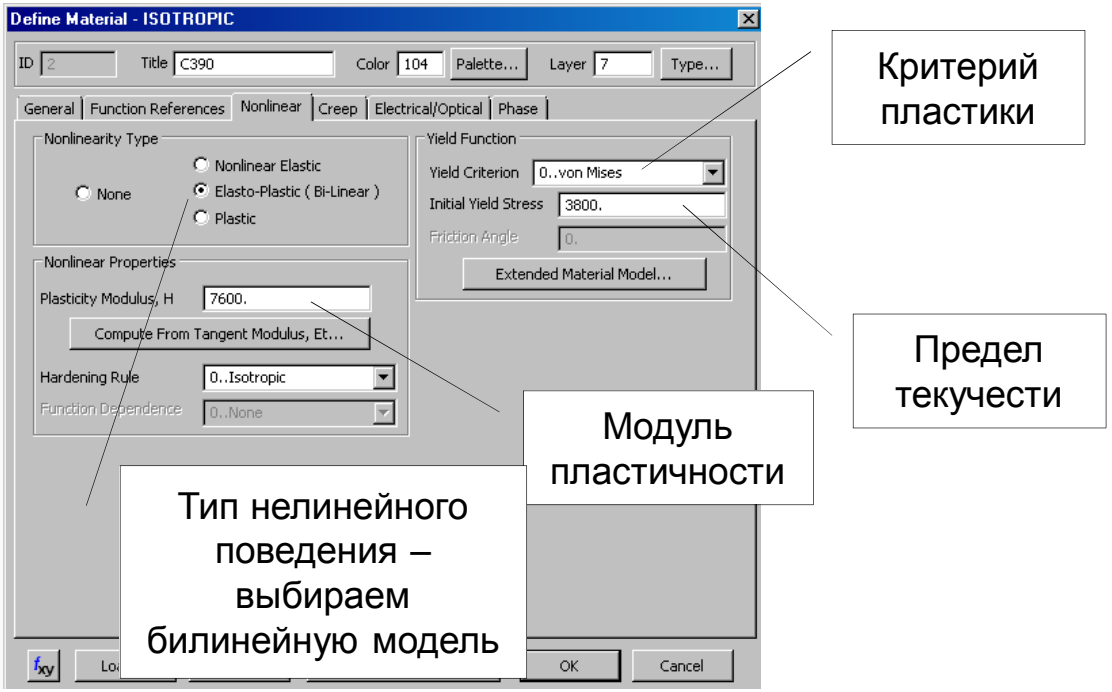
Так, для элементов, выполненных:

- из стали С390:	- из стали С345-3:	- из стали Ст 20:
R_{yn} = 3900 кгс/см^2,	R_{yn} = 3500 кгс/см^2,	R_{yn} = 2500 кгс/см^2,
R_{un} = 5400 кгс/см^2,	R_{un} = 4800 кгс/см^2,	R_{un} = 4200 кгс/см^2,
δ_5 = 20 %,	δ_5 = 25 %,	δ_5 = 25 %,
$\varepsilon_{ult} = 0{,}8 \cdot \delta_5$ = 16 %.	$\varepsilon_{ult} = 0{,}8 \cdot \delta_5$ = 20 %.	$\varepsilon_{ult} = 0{,}8 \cdot \delta_5$ = 20 %.

Шаг 7-й.

Задаем жесткости конечных элементов, материалы с поддержкой физически нелинейных свойств





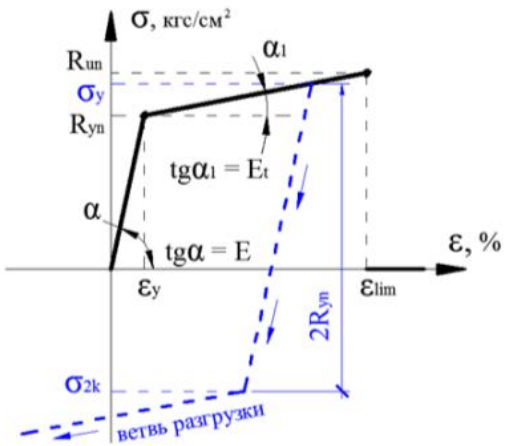


Рисунок 3.13. – Диаграмма работы материалов с кинематической моделью упрочнения (условно показана первая четверть)

Чтобы оценить уровень нагрузок, воздействие которых приведет к **пластическому деформированию** и разрушению рассматриваемой конструкции, в качестве критерия пластичности и прочности принята **энергетическая теория** прочности/пластичности **Губера–Мизеса**, оперирующая эквивалентными приведенными напряжениями (методика, заложенная в СНИП «Стальные конструкции»):

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}$$

, где σ_1, σ_2, σ_3 – главные значения тензора напряжений.

Разбиение геом. модели и создание конечно-элементной модели, задание нагрузок, граничных условий.

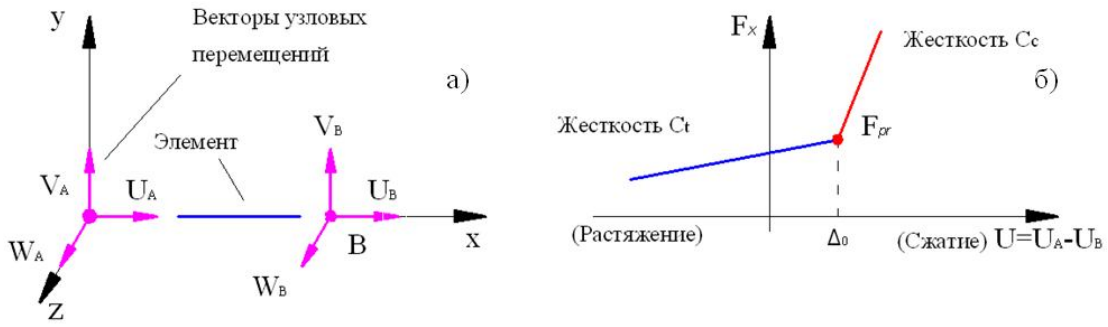
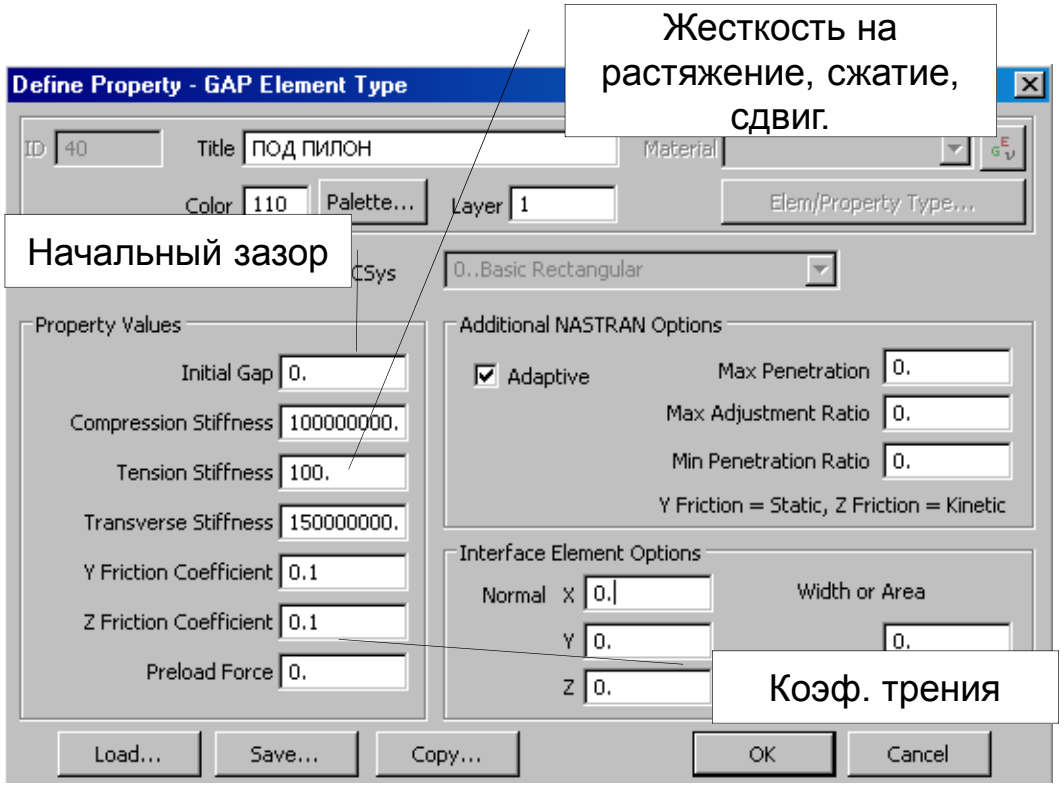


Рисунок 3.12. – а) координатная система «gap»-элемента;
б) зависимость осевой силы от деформации в «gap»-элементе

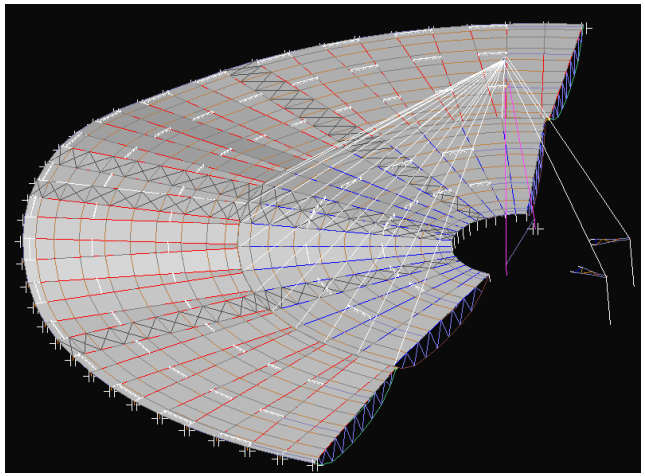


Особенности:

1. Использование контактных gap элементов (элемент позволяет моделировать наличие зазора, скольжения);

2. Для сбора нагрузок и трансформации их в массы для динамического расчета использованы оболочечные элементы фиктивной жесткости.

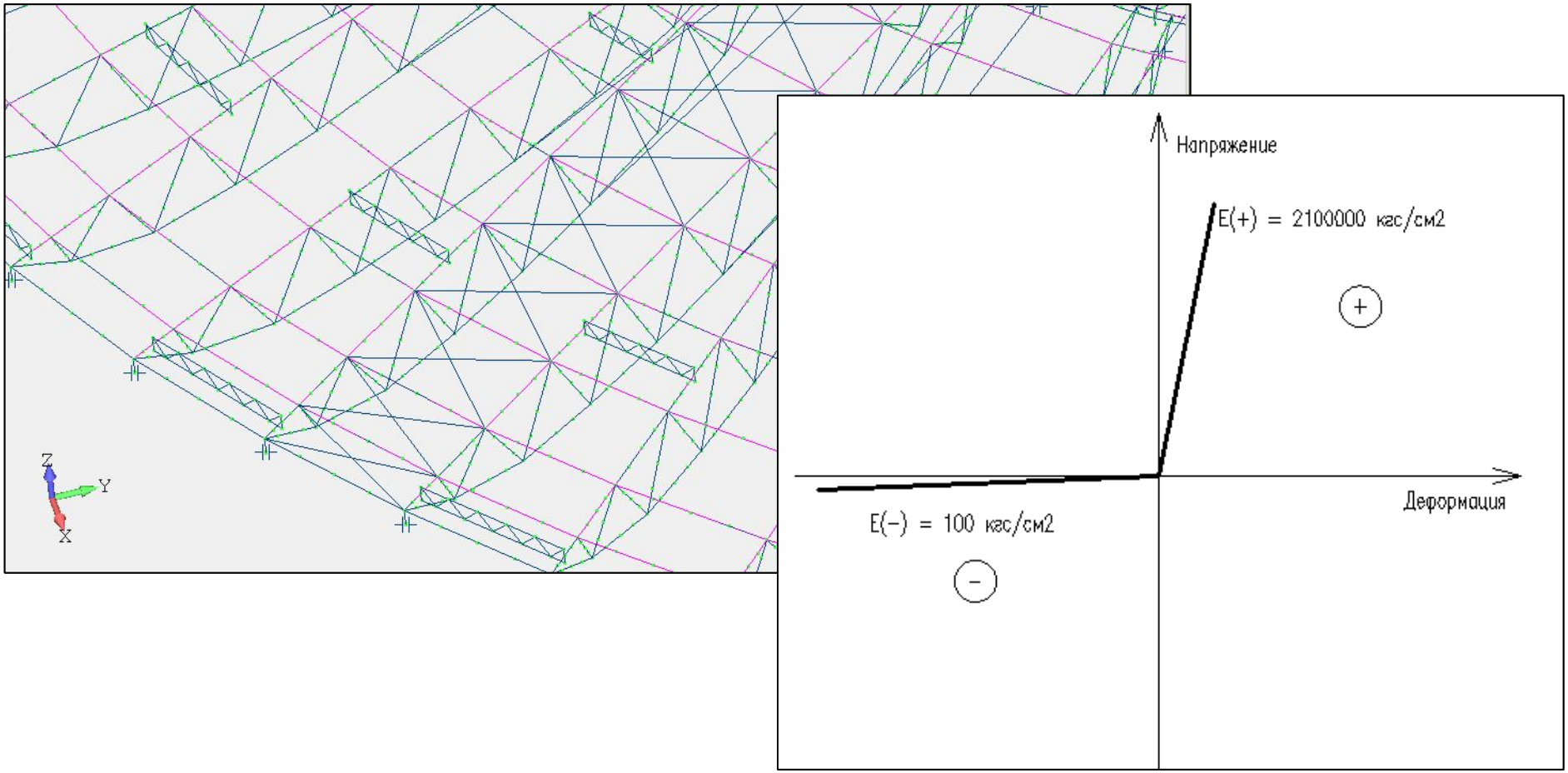
Gap-элементы ведут себя «капризно», порой приходится потратить много времени на подбор таких их жесткостных характеристик, чтобы получить хотя бы логичные результаты



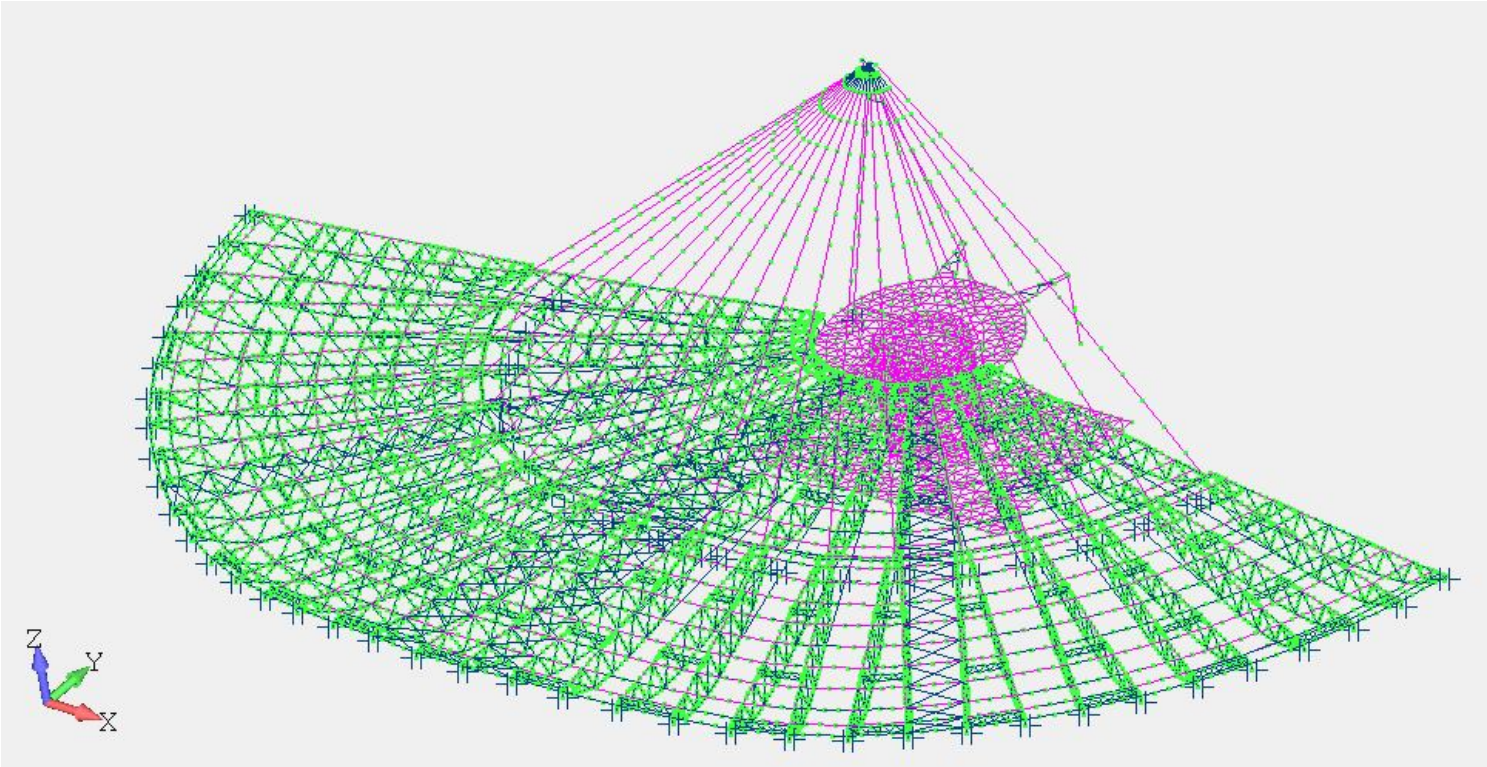
Особенности:

3. Моделирование связей. Для «улучшения» сходимости итерационного процесса при нелинейных расчетах - каждой связи соответствует только один конечный элемент. Материал для данных к.э. «искусственно» сделан физически нелинейным.

На растяжение – обычный модуль упругости, для сжатия – на несколько порядков меньше.



Итоговая математическая модель. Основные характеристики



Количество элементов: ~ 15 500 шт.

Количество узлов: ~ 11 600 шт.

Количество жесткостей: 44 шт.

Шаг 8-й. Отладка математической модели

3.2.4. Отладка математической модели

Для отладки математической модели выполнено сравнение результатов расчетов, полученных на моделях, созданных независимо друг от друга в двух программных комплексах Ansys (см. отчетную документацию проектной организации [87]) и Nastran (данная работа). В том числе эти результаты могут использоваться для оценки величин внутренних усилий, действующих в сооружении. Результаты сравнивались при комбинации нагрузок № 1. Расчет выполнен из условия предварительного натяжения вант на 70 % от собственного веса покрытия (без отрыва от временных опор).

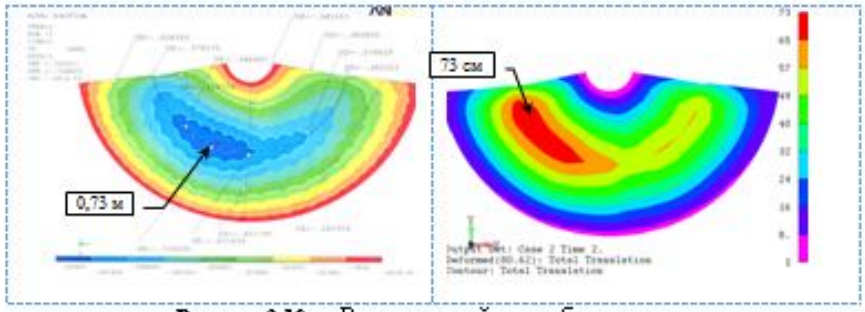


Рисунок 3.18. – Вертикальный прогиб покрытия. Слева – ПК Ansys (м), справа – ПК Nastran (см)

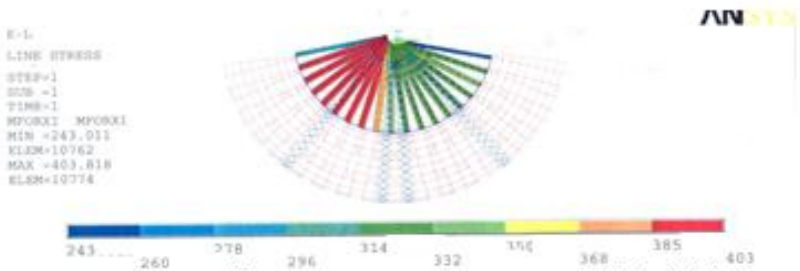


Рисунок 3.19. – Эпюры нормальных сил в вантах N(тс). ПК Ansys

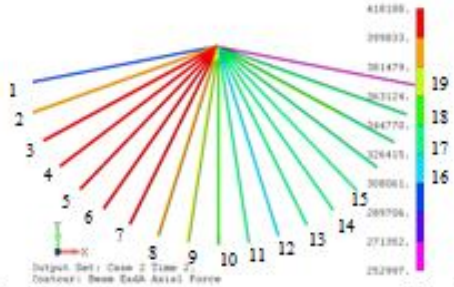


Рисунок 3.20. – Эпюры нормальных сил в вантах N (кгс). ПК Nastran. Схема нумерации вант к рис. 3.24 и 3.31

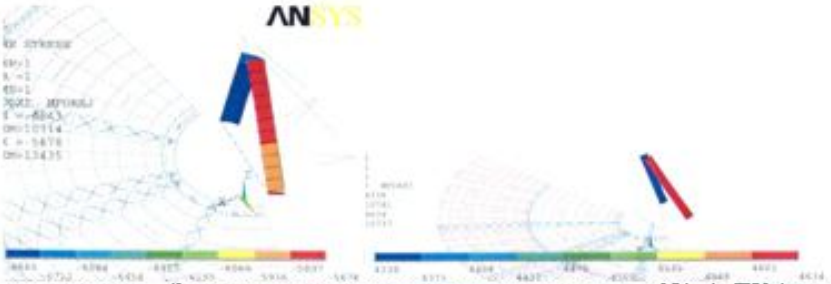


Рисунок 3.21. – Эпюры нормальных сил в пилоне и оттяжках N(тс). ПК Ansys

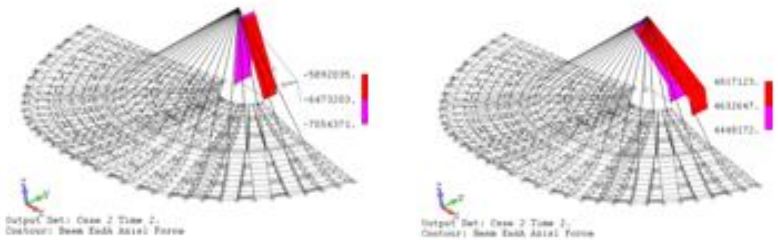


Рисунок 3.22. – Эпюры норм. сил в пилоне и оттяжках N (кгс). ПК Nastran

Результаты сравнения смотри в табл. 3.2 и на рис. 3.17 - 3.21. В скобках таблицы и далее по тексту указаны величины НДС, возникающие при нагрузках комбинации № 2.

Важный этап, влияющий на достоверность результатов – отладка математической модели: расчет в другом комплексе, модельные и натурные испытания

Шаг 8-й. Отладка математической модели. Статические модельные испытания ЦНИИС

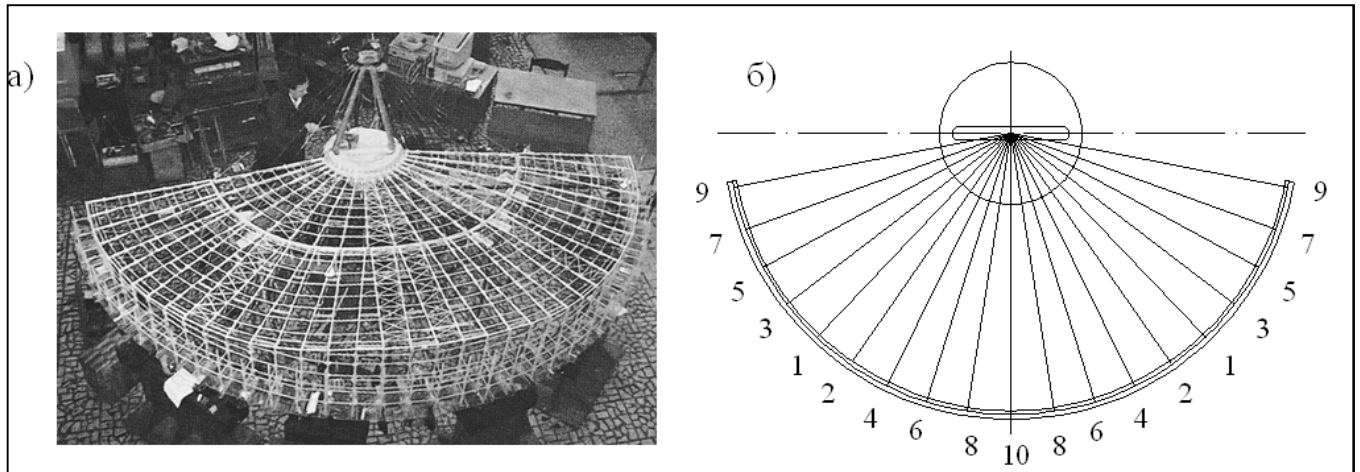


Рисунок 3.23. – а) Модель сооружения для статических испытаний;
б) последовательность раскружаливания вант

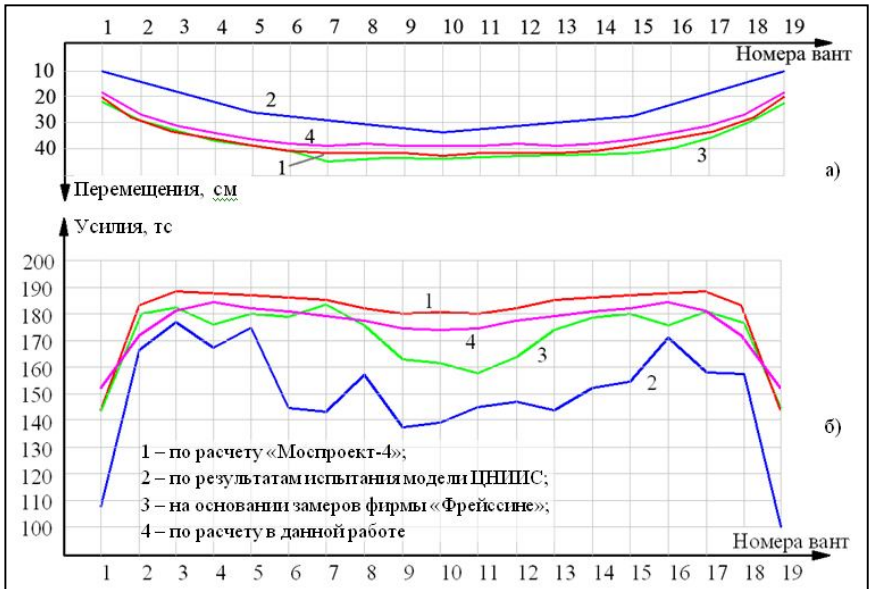


Рисунок 3.24. – а) Графики вертикальных перемещений контрольных точек полукольцевой балки после раскружаливания покрытия;
б) графики усилий *N* в вантах после раскружаливания покрытия

Шаг 8-й. Отладка математической модели. Основные параметры НДС для неповрежденного состояния

Таблица 3.2. – Сравнение мат. моделей при нагрузках комбинации № 1

Параметр сравнения	ПК Ansys	ПК Nastran	Разница по макс. знач., %
Ванты, N (тс)	**240… 405**	**250… 420** (175… 250)	3,1
Наклонная левая оттяжка, N (тс)	**4630**	**4820** (2900)	2,5
Наклонная правая оттяжка, N (тс)	**4340**	**4450** (2780)	3,9
Затяжка по пилону, N (тс)	**1050**	**1070** (640)	1,8
Левая нога пилона, N (тс)	**5680**	**5890** (3980)	3,0
Правая нога пилона, N (тс)	**6840**	**7050** (4280)	3,6
Кольцевая балка, N (тс)	**- 35… 15**	**- 30… 10** (- 18… 6)	16,6
Верхний пояс Ф1, N (тс)	**- 460… - 220**	**- 470… - 210** (- 285… -130)	- 2,1
Нижний пояс Ф1, N (тс)	**50… 150**	**58… 158** (35… 96)	5,1
Раскос Ф1, N (тс)	**- 37… 17**	**- 45… 22** (- 27… 13)	- 17,8
Верхний пояс Ф2, N (тс)	**- 123… - 27**	**- 140… - 30** (- 85… - 18)	- 12,1
Нижний пояс Ф2, N (тс)	**41… 160**	**50… 169** (30… 97)	5,3
Раскос Ф2, N (тс)	**- 32… 13**	**- 34… 13** (- 21… 8)	- 8,3
Вертикальный прогиб покрытия (см)	**72,8**	**73,5** (65)	1,0

Совпадение по второстепенным элементам (все элементы ферм удовлетворительное, разница от 8 до 18 %. Результаты по главным элемента (ванты, пилон, затяжки и т. д.) показали хорошее совпадение, разница мене 4%.

Поскольку расчеты на отказ ведутся в физ. нел. постановке, заранее полезно узнать «запасы» прочности по нормальным/эквивалентным напряжениям

В табл. 3.3 в виде нормальных напряжений приведены результаты расчетов для неповрежденного покрытия. Величины напряжений позволяют судить о **существенном недонапряжении** элементов на 30 - 60 % при нагрузках комбинации № 1, на 40 - 75 % при нагрузках комбинации № 2.

Таблица 3.3. – Максимальные нормальные напряжения в элементах

Вид элемента		σ_{max}, кгс/см^2 / № кэ, № фибр. точки		Материал конструкций	$R_{уть}$ кгс/см^2
		Комбинация нагрузок № 1	Комбинация нагрузок № 2		
Ванты		9300 / 1498 el, EndA Pt2 (N_{max} = 420 тс)	5750 / 1498 el, EndA Pt2 (N_{max} = 250 тс)	17500 (Тип 31Н15, $N^{min}_{разрыва}$ = 820 тс)	
Левая оттяжка		2840 / 4265 el, EndA Pt1	1700 / 4265 el, EndA Pt2	С390	3900
Правая оттяжка		2660 / 4327 el, EndA Pt3	1630 / 4327 el, EndA Pt3		
Затяжка по пилону		2720 / 2029 el, EndA Pt3	1700 / 2029 el, EndA Pt3		
Левая нога пилона		- 1590 / 6989 el, End A Pt3	- 1050 / 6989 el, End A Pt3		
Правая нога пилона		- 2370 / 6910 el, End A Pt3	- 1410 / 6910 el, End A Pt3		
Кольцевая балка		- 240 / 9701 el, End A Pt4	- 120 / 9701 el, End A Pt4	С345-3	3500
Фермы Ф1	Верхний пояс	- 80 / 2325 el, End A Pt2	- 50 / 2325 el, End A Pt2	-	-
	Нижний пояс	1460 / 3264 el, End A Pt2	850 / 3264 el, End A Pt2	Ст 20	2500
	Раскосы	- 1350 / 4117 el, End A Pt2	- 770 / 4117 el, End A Pt2		
Ф2	Верхний пояс	- 65 / 5487 el, End A Pt3	- 35 / 5487 el, End A Pt3	-	-
	Нижний пояс	1550 / 7689 el, End A Pt4	900 / 7689 el, End A Pt4	Ст 20	2500
	Раскосы	- 1060 / 9610 el, End A Pt2	- 530 / 9610 el, End A Pt2		

Рекомендуемый порядок анализа реакции сооружения на повреждения:

1. Предварительный логико-топологический анализ конструктивной формы в контексте потенциальной стойкости к повреждениям

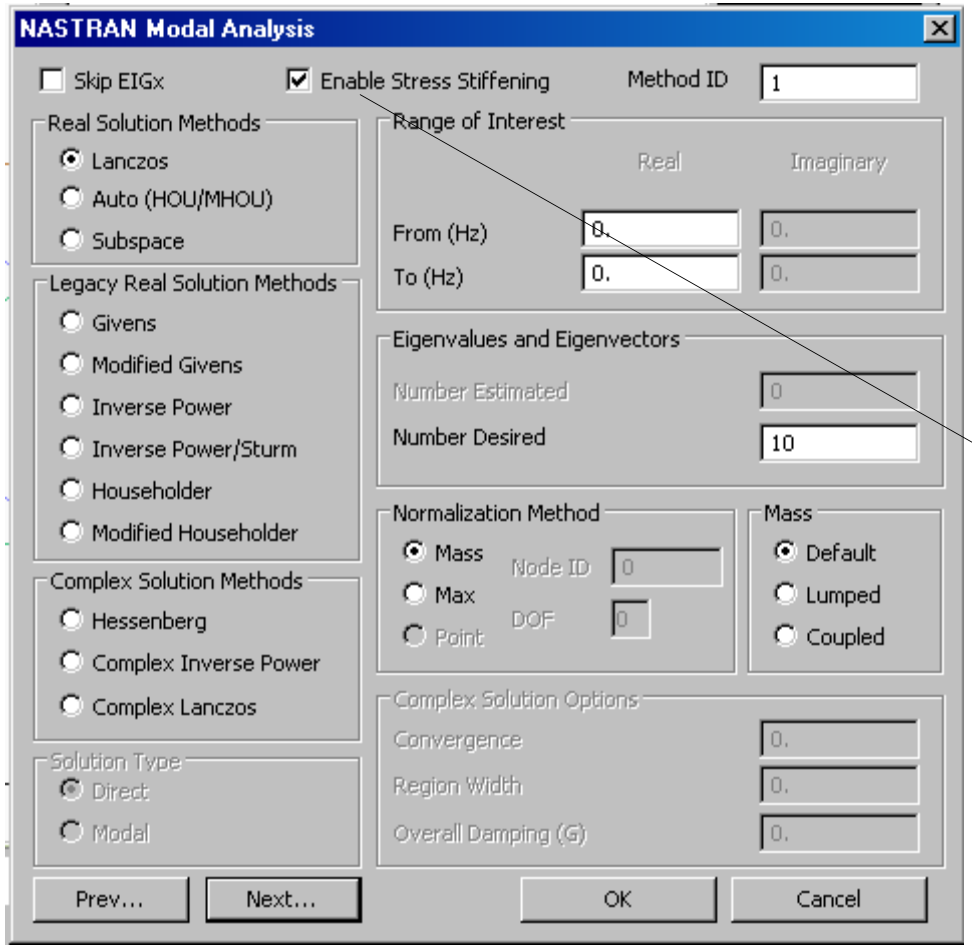
2. Изменение частот и форм, потенциальной энергии деформаций, форм потери устойчивости и пр. при различных повреждениях

3. Отклик сооружения при повреждения в нелинейной статической постановке

4. Отклик на повреждения в нелинейной динамической постановке

Переходим к следующему этапу…

Шаг 9-й. Предварительная оценка повреждений по изменению частот и форм



Прежде чем вычислять частоты и формы, следует отметить, что…

Опция учета «жесткости конструкции в деформированном состоянии»

ИЗМЕНЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОТ ЭФФЕКТА ТОЛЬКО ГЕОМ. НЕЛИНЕЙНОСТИ

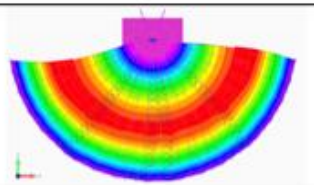
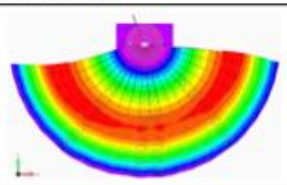
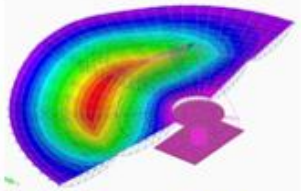
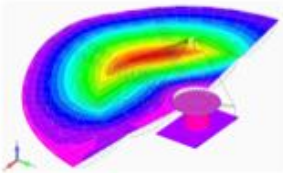
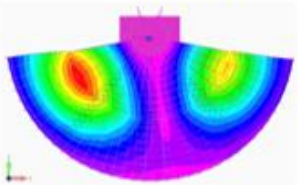
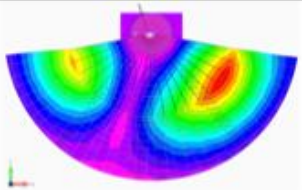
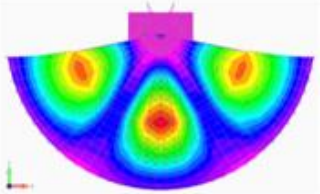
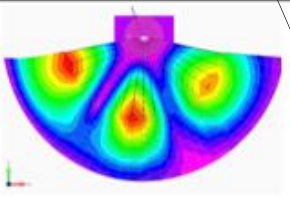
ВРЕМЯ РАСЧЕТА НА «ОБЫЧНОМ» КОМПЬЮТОРЕ – 5-10 МИН.

…поскольку покрытие обладает значительно выраженной геом. нел. работой, то вычислить **частоты собственных колебаний** не получится, необходимо использовать **частоты свободных колебаний**.

Вначале до их вычисления программный комплекс выполняет расчет НДС покрытия в геом. нел. постановке. Эти данные используется в качестве **начальных условий** для расчета частот и форм свободных колебаний.

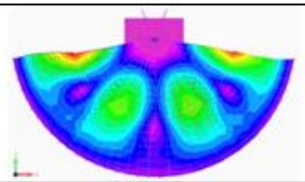
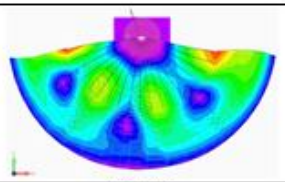
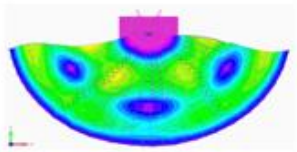
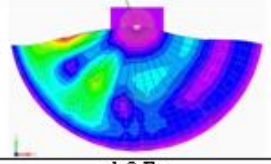
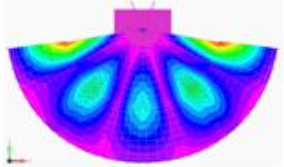
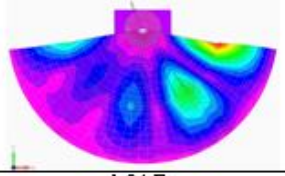
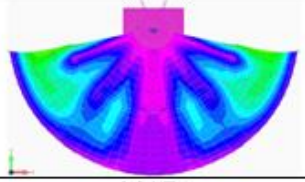
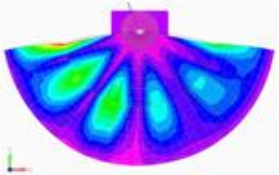
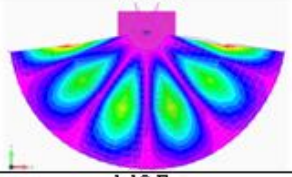
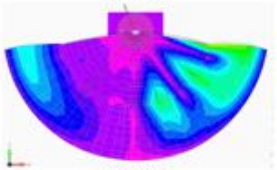
Шаг 9-й. Предварительная оценка повреждений по изменению частот и форм

Таблица 3.5. – Формы и частоты свободных колебаний неповрежденного и поврежденного покрытия при нагрузках комбинации № 2

№ формы	Неповрежденное	Поврежденное отказом оттяжки
1		
	0,42 Гц	0,42 Гц
2		
	0,72 Гц	**0,57 Гц**
3		
	0,81 Гц	0,76 Гц
4		
	0,94 Гц	0,93 Гц

Отказ оттяжки заметно сказывается только на второй частоте с «изгибной» формой колебаний. Что в прочем «логично».

Окончание **таблицы 3.5**

5		
	0,98 Гц	0,96 Гц
6		
	1,02 Гц	1,0 Гц
7		
	1,03 Гц	1,04 Гц
8		
	1,14 Гц	1,13 Гц
9		
	1,19 Гц	1,18 Гц

При возрастании номера частоты наблюдается увеличения количество «волн». Колебания покрытия визуально «схожи» с колебаниями простыни

В научной литературе встречаются публикации, в которых схожую оценку проводят путем анализа изменения форм потери устойчивости при наличии повреждений.

Шаг 9-й. Предварительная оценка повреждений по изменению потенц. энергии

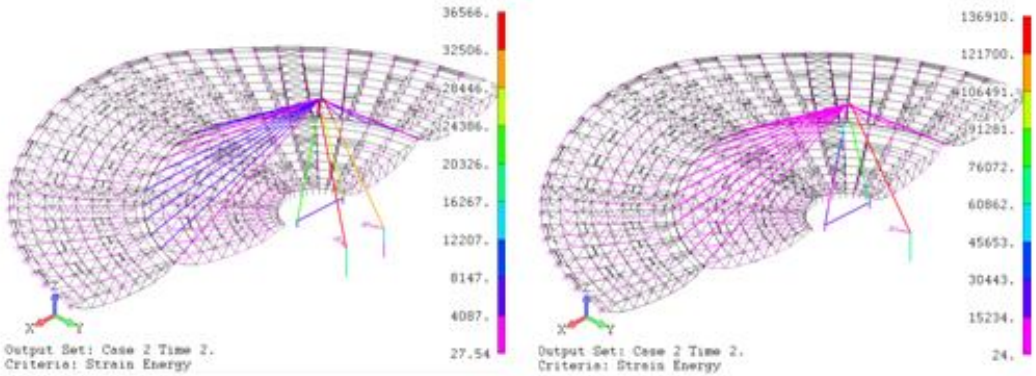


Рисунок 3.35. – Нел. стат. расчет. Мозаики потенциальной энергии деформации U (кгс·см²/с²). Слева до отказа, справа – после

О рискованности принятого конструктивного решения, когда вес «половины» покрытия «перекидывается» через одну точку, удерживаемую оттяжками, свидетельствует сильная неравномерность в распределении потенциальной энергии деформации между отдельными элементами сооружения. Так до отказа (после отказа) на элементы двух оттяжек приходится 18 (25) % всей энергии, на элементы 19 вант – 47 (36) %, на элементы ног пилона – 11 (16) %, на затяжку по ногам – 1,2 (0,9) %. Т. е. на элементы пилонной группы приходится около **80** % энергии всего сооружения.

Потенциальная энергия деформации сооружения до отказа равна $2{,}75 \cdot 10^6$ кгс·см²/с², после отказа – $3{,}67 \cdot 10^6$ кгс·см²/с². Распределение энергии по конечным элементам показано на рис. 3.35.

Показательна величина безразмерного коэффициента, предложенного В.М. Фридкиным (см. главу 1) и равная: $\eta_i = \Delta U_i / \Delta U = 0{,}5 \cdot 0{,}175 \cdot 2{,}75 \cdot 10^6 / ((3{,}67 - 2{,}75) \cdot 10^6) =$ **0,26**. Сравни величину этого коэффициента с изменением вторых частот свободных колебаний поврежденного покрытия и неповрежденного (см. вторую строку табл. 3.4).

Иногда полезно проанализировать изменение потенциальной энергии системы при наличии повреждений.

Таблица 3.4. – Изменение частот свободных колебаний в зависимости от вида повреждений и величины нагрузки

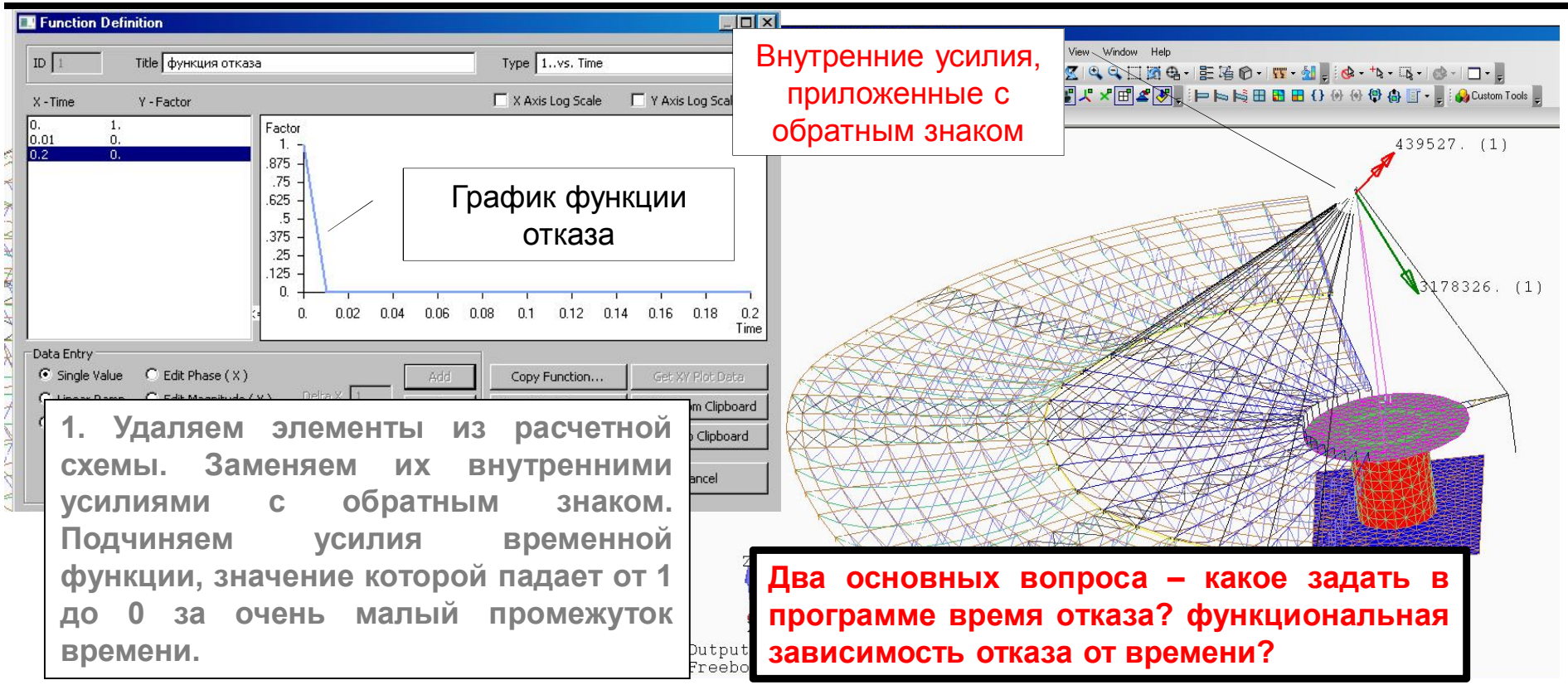
№	Описание повреждения	Частоты покрытия, Гц							
		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8
1	Покрытие без повреждений	**0,42**	**0,72**	**0,81**	**0,94**	**0,98**	**1,02**	**1,03**	**1,14**
2	Отказ оттяжки или упора оттяжки в ж.б. башню	0,42	0,57	0,76	0,93	0,96	1,0	1,04	1,13
		0 %	**-26 %**	- 6,6 %	- 1 %	- 2 %	- 2 %	1%	- 1 %
3	Локальный отказ кольцевой балки	0,42	0,71	0,79	0,92	0,95	0,99	1,0	1,08
		0 %	- 1,4 %	- 2,5 %	- 2,2 %	- 3,1 %	- 3 %	- 3 %	- 5 %
4	Покрытие без повреждений при нормативных нагрузках (летний вариант)	0,46	0,78	0,88	1,01	0,96	1,05	1,08	1,10
		8,7 %	7,7 %	7,9 %	6,9 %	- 2 %	2,8 %	4,6 %	- 3,6 %
5	То же при нормативных нагрузках, включающих полную неравномерную снеговую (220 и 280 кгс/м²)	0,59	1,06	1,16	1,22	1,23	1,28	1,29	1,30
		28,8 %	**32 %**	30 %	23 %	20 %	20 %	20 %	12,3 %
6	То же при расчетных нагрузках, включающих полную неравномерную снеговую (270 и 350 кгс/м²)	0,59	1,06	1,16	1,27	1,28	1,30	1,34	1,35
		28,8 %	32 %	30 %	26 %	23 %	22 %	23 %	15 %

Можно с некоторой «натяжкой» сказать, что повреждение покрытия отказом оттяжки для покрытия эквивалентно по величине изменения частот увеличению нагрузок с нормативных величин до расчетных.
Так изменение частоты при отказе оттяжки при нормативных нагрузках -26%, увеличение нагрузки до расчетной (в два раза) дает изменение частоты на 32%.

Моделирование повреждения, переход к динамической задаче

В качестве примера моделирования аварийной ситуации рассматриваем самое «интересное» повреждение – отказ левой оттяжки

Шаг 10-й. Моделирования повреждения на примере отказа левой оттяжки



1. Удаляем элементы из расчетной схемы. Заменяем их внутренними усилиями с обратным знаком. Подчиняем усилия временной функции, значение которой падает от 1 до 0 за очень малый промежуток времени.

Два основных вопроса – какое задать в программе время отказа? функциональная зависимость отказа от времени?

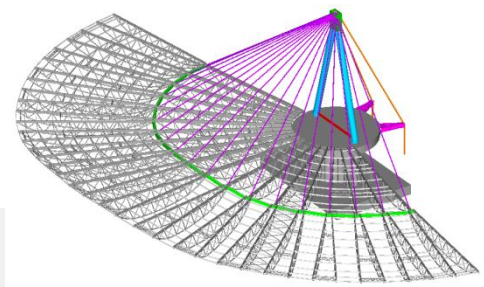
Время отказа рекомендуется назначать меньшим **1/40…1/20** основного периода колебаний.

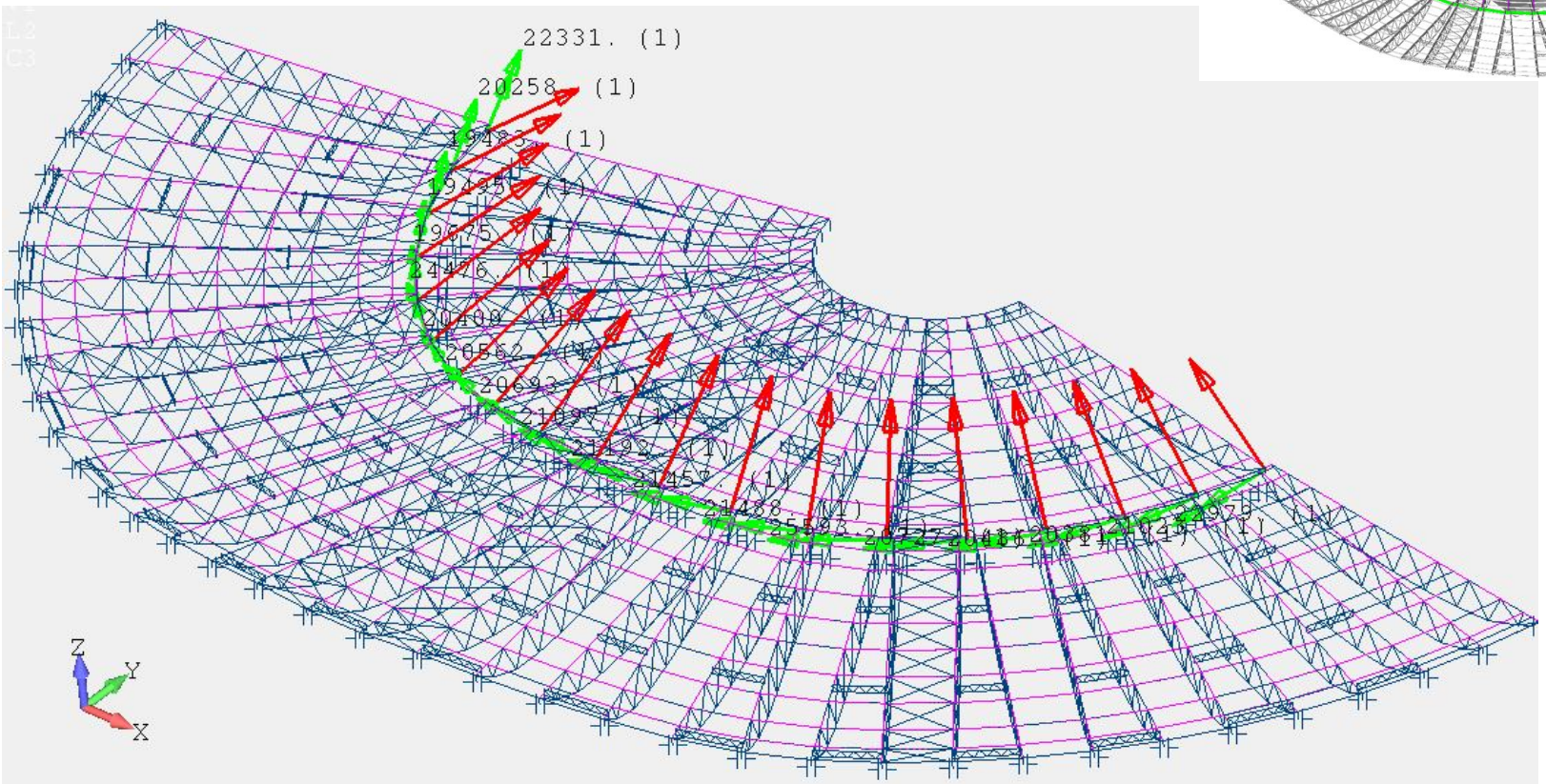
В идеале при первом варианте вид такой зависимости должен устанавливаться экспериментальным путём и быть разным **для разных усилий**, но, учитывая высокую скорость отказа, зависимость можно принять линейной и одинаковой для всех усилий.

Правомерность использования **линейной** функции при больших значениях времени отказа вызывает сомнения, т. к. не известно влияние усиливающейся «**неравновесности» внутренних усилий** в сечении.

Альтернативный вариант, получивший название смерть и рождение конечных элементов (англ. **birth** and **death**), основан на поэтапном уменьшении за короткий промежуток времени $t_{отк}$ жесткости отказавшей части конструкции. Недостаток второго варианта – **худшая сходимость** итерационных процессов, обусловленная наличием в матрице жесткости членов, малых по абсолютной величине (E_1=0.00001*E_0).

Пример моделирования повреждения в виде отказа верхнего узла пилона





Из расчетной схемы удален, не только верхний узел, но и все «мешающиеся» конечные элементы: оттяжек, пилона, ж.б. опоры и т.д.

К вопросу о повреждениях дискретных и континуальных систем

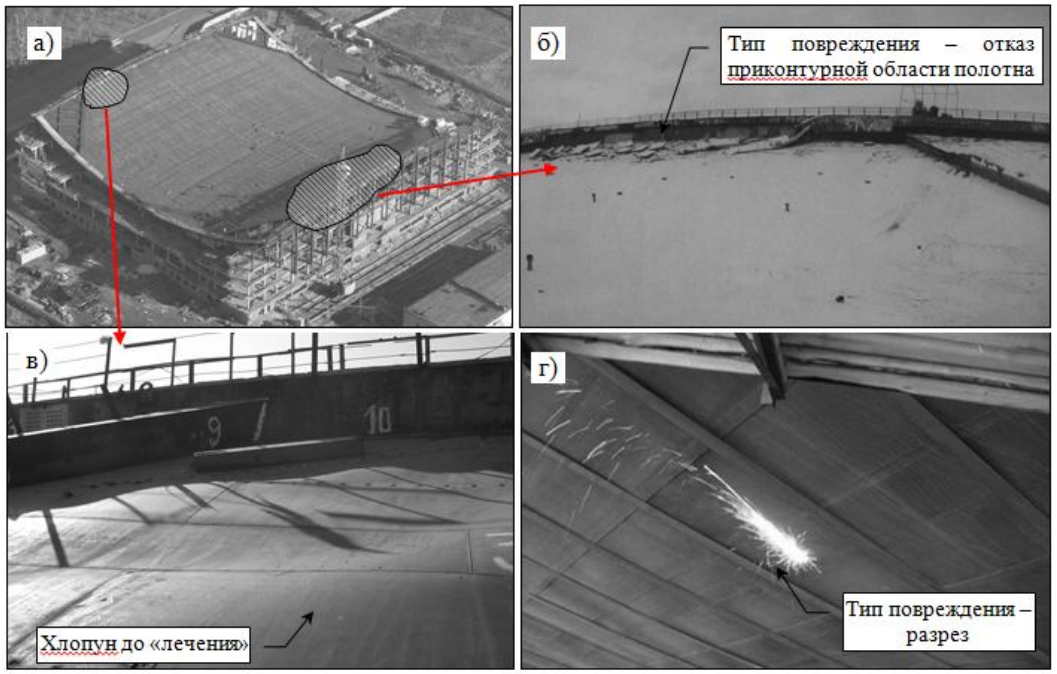
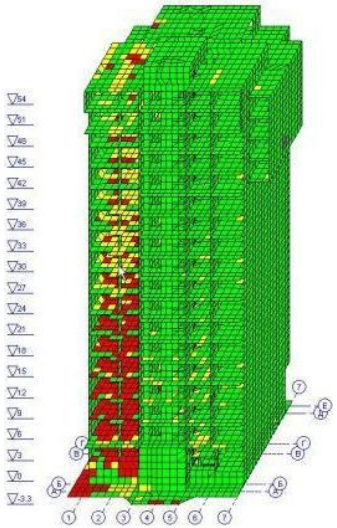


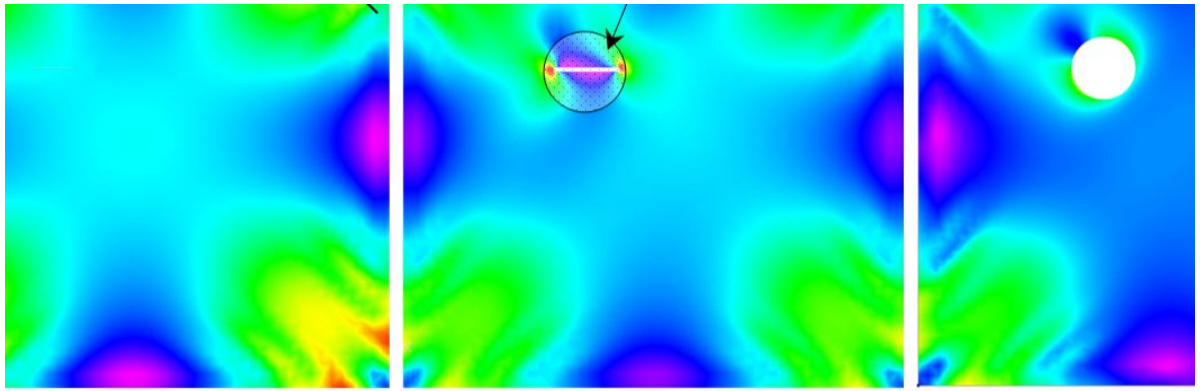
Рисунок 2.5. – Повреждения мембранного покрытия стадиона «Ермак» в г. Ангарск: а) мембранное покрытие; б) последствия пожара на области; в) хлопуны в угловой зоне оболочки; г) процесс ликвидации хлопуна

Для континуальных конструкций «не применим» принцип единичного отказа, для них актуальна проблема нормирования «величины» повреждения (отказ области, участка, трещина, разрез) и т.д.

«Единичное» повреждение – предполагает ряд существенных допущений и ограничений:

- **его не умышленную природу, т.е. такое тестовое повреждение не решает проблему устойчивости к терроризму (к спланированным акциям);**
- **такое повреждение не эквивалентно конкретным повреждающим воздействиям (например, столкновению автомобиля с колонной);**
- **вероятность такого повреждения равна 1 и т.д.**

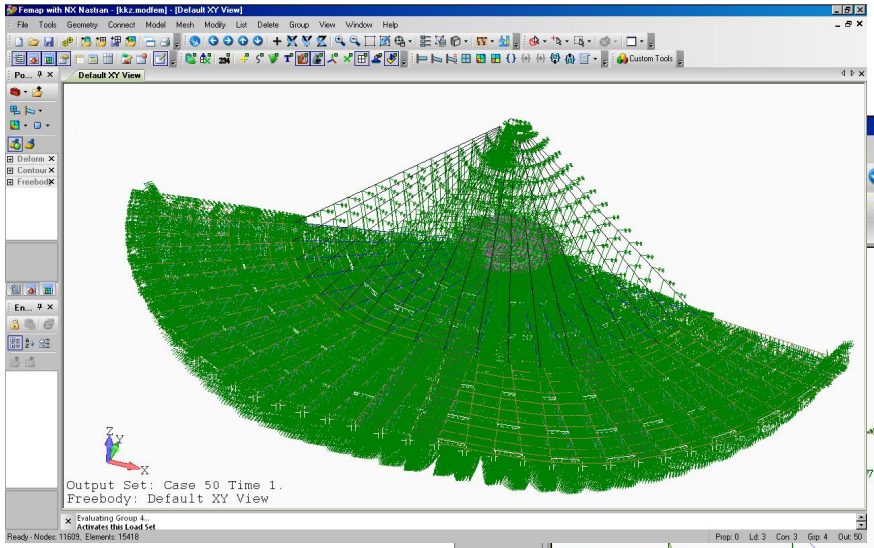


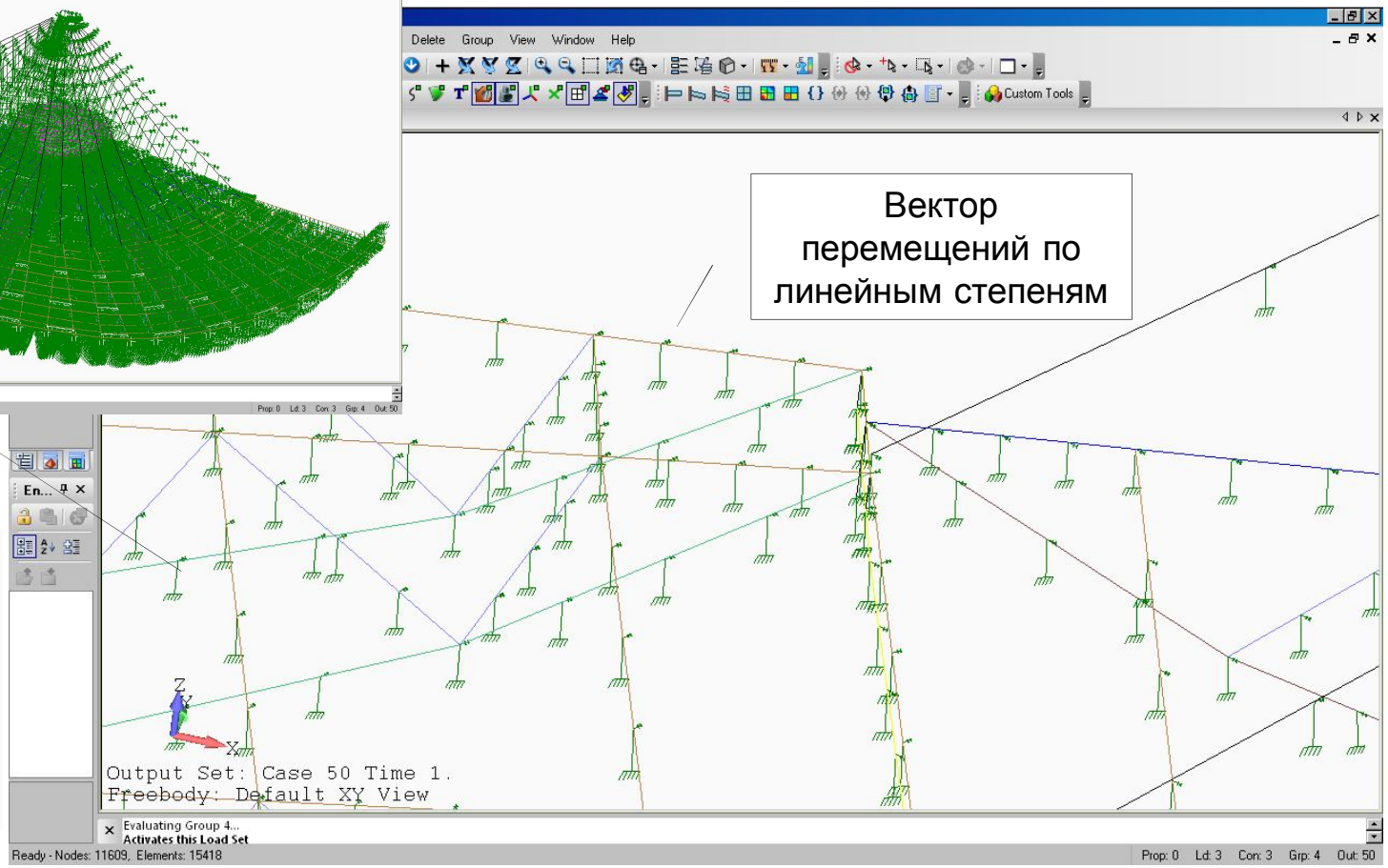


Шаг 11-й. Задаем начальные условия для динамической задачи

Задание начальных условий (initial conditions) для динамического расчета. Задаются перемещения (по всем степеням свободы) узлов, полученные при расчете до повреждения.

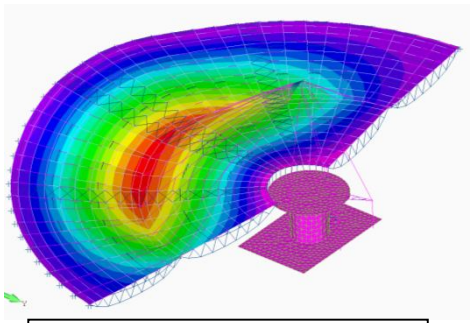
Некоторые расчетные комплексы делают эту процедуру автоматически





Вектор перемещений по линейным степеням

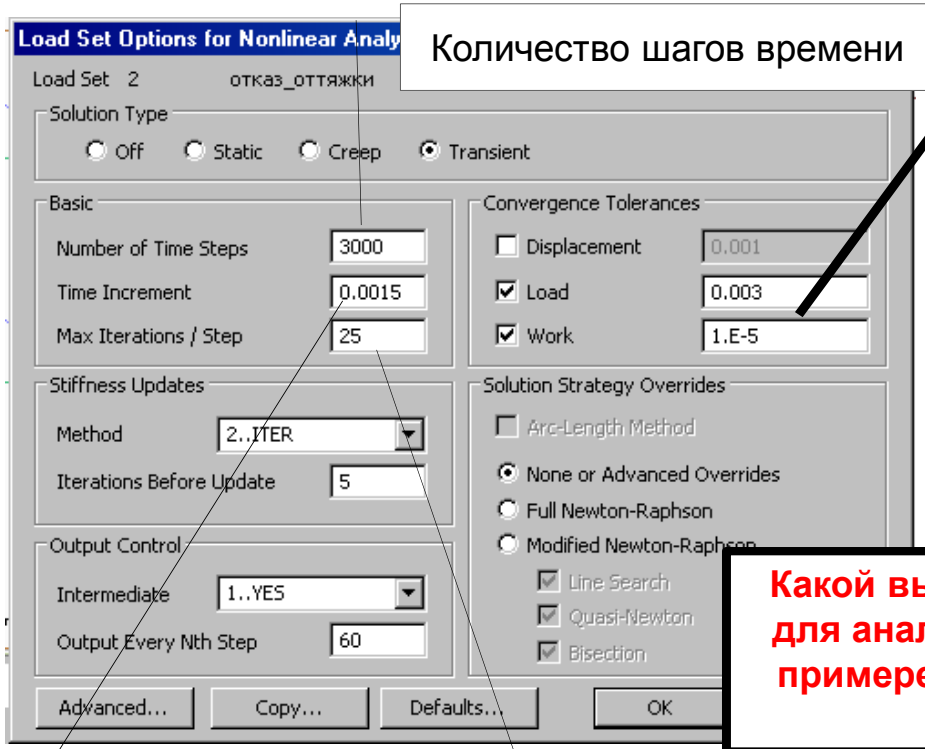
Вектор углов поворота



Эпюра прогибов неповрежденного покрытия

Укрупненный фрагмент модели

Шаг 12-й. Задаем параметры нелинейного динамического расчета

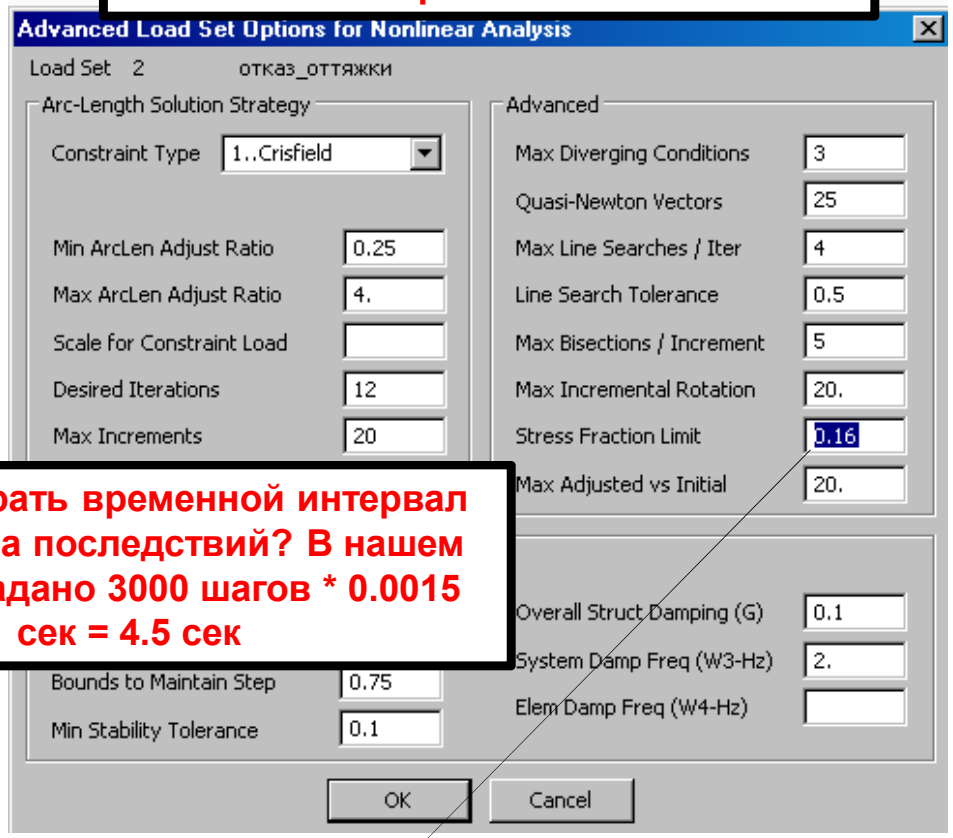


Количество шагов времени

Шаг по времени

Max кол-во итераций в шаге

Условия сходимости для нелинейного расчета

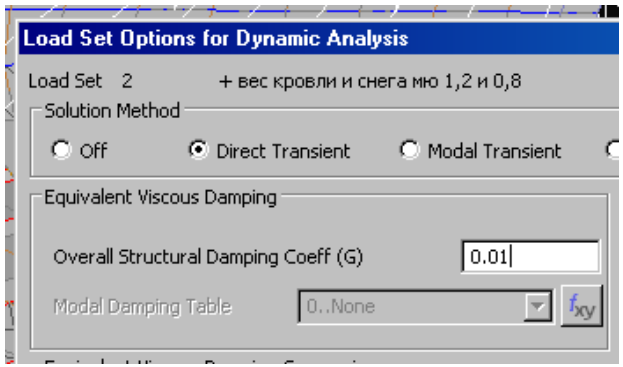


Какой выбрать временной интервал для анализа последствий? В нашем примере задано 3000 шагов * 0.0015 сек = 4.5 сек

Предельная величина отн. пласт. деформации

Выбираем и задаем опции динамического расчета:

-Поддержка геом. и физ. нелинейности;
- прямое интегрирование во времени;
- общий коэффициент демпфирования 0.01.



Прямое интегрирование системы уравнений движения (2.4) выполняется бета-методом Ньюмарка.

$$[M]\cdot\{\ddot{u}(t)\}+[B]\cdot\{\dot{u}(t)\}+[K]\cdot\{u(t)\}=\{P(t)\} \qquad (2.4)$$

где:

$[M]$, $[B]$, $[K]$ – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости;

$\{P\}$ – вектор внешней нагрузки;

$\{u(t)\}$ – вектор перемещений узлов;

$\{\dot{u}(t)\}$ – вектор скоростей в узловых точках;

$\{\ddot{u}(t)\}$ – вектор ускорений в узловых точках.

Шаг 5-й. Протокол расчета. Система выбирает приемлемый шаг по времени

Femap with NX Nastran - [нелинейные_частоты_ККЦ_целая.modfem : Default XY View]

File Tools Geometry Connect Model Mesh Modify List Delete Group View Window Help

Custom Tools

NX Nastran Analysis Monitor

Status : Active

Num Queued : 1 Active Set : 3

Job Name : тестовый расчет 1-я стадия

Model Name : C:\Users\Drobot\Desktop\СТАКО_СЕМИНАР\нелинейные_частоты_ККЦ_целая.modfem

Elapsed Time : 00:03:47

log

f04

f06

```
0                          N O N - L I N E A R   I T E R A T I O N   M O D U L E   O U T P U T

     STIFFNESS UPDATE TIME          2.63 SECONDS
                                                    SUBCASE        1
            ITERATION TIME          2.39 SECONDS                                                    LOAD FACTOR   0.0500000

                        - - - CONVERGENCE  FACTORS - - -                    - - - LINE SEARCH DATA - - -
OITERATION      EUI          EPI          EWI       LAMBDA       DLMAG       FACTOR     E-FIRST     E-FINAL   NQNV  NLS  ENIC  NDV  MDV

         1  9.9000E+01  2.4906E+02  2.4906E+02  1.0000E-01  5.0420E+01  6.2500E-02 -1.2613E+04 -2.4414E+00     0    4          1    1
         2  1.7865E+01  1.8161E+02  2.6328E+01  4.1456E-01  1.0586E+02  8.4299E-02 -4.6583E+01 -7.6205E-02     1    2          0    1
 *** USER INFORMATION MESSAGE 6187 (NCONVG)
     BISECTION METHOD IS ACTIVATED DUE TO LARGE INCREMENTAL ROTATIONS AT ITERATION NO.   3
         1  2.1309E+01  3.9769E+02  1.3299E+02  1.0000E-01  1.6344E+02  6.2500E-02 -3.2963E+03 -1.7360E+01     0    4          1    1
         2  1.8724E+01  3.6449E+02
3.0989E+01  5.0802E-01  2.1014E+02  8.7132E-02 -1.5978E+01 -1.6100E-01     1    2          0    1
 *** USER INFORMATION MESSAGE 6187 (NCONVG)
     BISECTION METHOD IS ACTIVATED DUE TO LARGE INCREMENTAL ROTATIONS AT ITERATION NO.   3
         1  5.9145E-01  3.7106E+02  4.1809E+00  1.0000E-01  2.1084E+02  4.2461E-03 -8.3721E+02 -3.5449E+01     0    4          1    1
         2  4.3805E+00  3.6437E+02  4.9107E+00  5.4099E-01  2.2444E+02  4.2860E-02 -2.5539E+01 -1.1835E-02     1    2          0    1
         3  1.7932E+01  3.3218E+02  6.9574E+00  7.2632E-01  3.0467E+02  1.8296E-02 -1.7304E+02  2.5178E-01     2    3          1    1
         4  1.6315E-01  3.1967E+02  6.7335E+00  8.4433E-01  3.4913E+02  6.9579E-03 -1.2551E+03  6.6560E-02     3    3          1    1
         5  2.6633E+01  2.8234E+02  1.1719E+01  8.3383E-01  6.1154E+02  2.8363E-02 -2.9313E+02 -3.3175E-01     4    2          0    1
 *** USER INFORMATION MESSAGE 4550 (NCONVG)
     *** NEW STIFFNESS MATRIX IS REQUIRED ***
     User information:

  This is issued based on the stiffness matrix
     on the NLPARM or TSTEPNL entry, or when the
     or its penalty value is adjusted after conv
```

Update Monitor Max Lines 5000

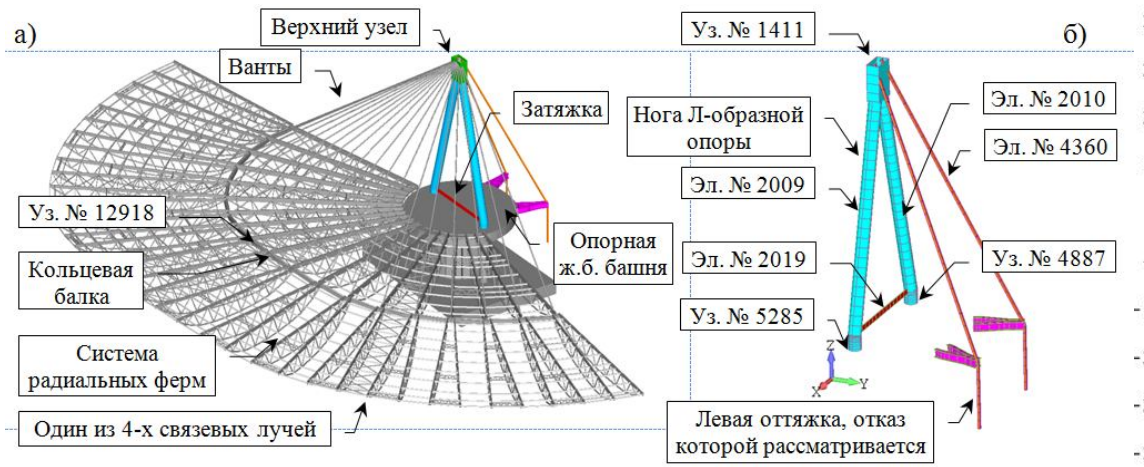
Система снижает шаг, поскольку нет сходимости решения при «крупном» начальном шаге

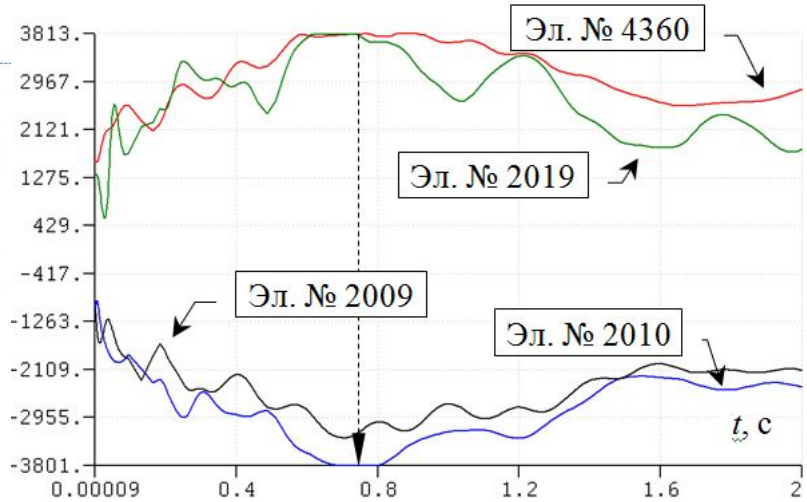
```
0                          N O N - L I N E A R   I T E R A T I O N   M O D U L E   O U T P U T

     STIFFNESS UPDATE TIME          3.31 SECONDS                                                    SUBCASE
 1
            ITERATION TIME          0.51 SECONDS                                                    LOAD FACTOR   0.0125000

                        - - - CONVERGENCE  FACTORS - - -                    - - - LINE SEARCH DATA - - -
OITERATION      EUI          EPI          EWI       LAMBDA       DLMAG       FACTOR     E-FIRST     E-FINAL   NQNV  NLS  ENIC  NDV  MDV

        11  1.7509E+02  5.3546E+00  7.3512E-01  1.0000E-01  6.8096E+01  1.0000E+00 -7.4946E-02 -7.4946E-02     0    0          0    1
        12  2.5353E-01  5.2681E+00  2.8168E-01  5.4192E-01  5.0711E+02  6.8760E-01 -6.6076E-01  2.3679E-01     1    1          0    1
        13  2.1934E-03  4.5156E+00  1.1790E-02  6.9954E-01  4.5929E+02  1.2300E-01 -1.2199E+00  4.2553E-01     2    2          0    1
        14  1.6917E+01  2.1612E+00  3.1251E-02  5.8907E-01  9.8899E+01  1.0000E+00 -2.6609E-01 -2.6609E-01     3    0          0    1
        15  3.6106E-01  4.6724E-01  7.5942E-03  4.0263E-01  4.4984E+01  1.0000E+00  2.2013E-02  2.2013E-02     4    0          0    1
```

Проанализируем результаты численных расчетов при отказах в динамической постановке

Результаты численных динамических расчетов отлаженной математической модели **неусиленного** покрытия на ряд тестовых повреждений показывают, что:

1. Вопрос сохранности покрытием несущей способности при отказе оттяжки находится в пределах погрешностей численных расчетов, т. к. полученные напряжения в элементах Л-образной опоры и второй оттяжки близки к расчетному сопротивлению при действии нормативных постоянных и временных длительных составляющих нагрузок. **В случае бóльших нагрузок покрытие обрушится**;





Нормальные напряжения в оттяжке (эл. № 4360), ногах пилона (эл. № 2009, 2010), затяжке по пилону (эл. № 2019), кгс/см²;

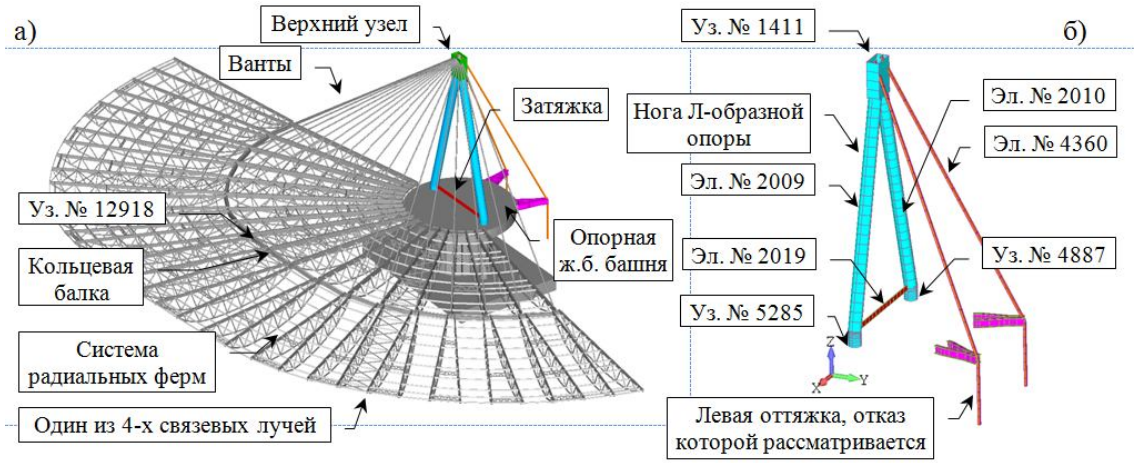
Величина шага интегрирования, автоматически выбираемая программным комплексом из условий сходимости решения, в процессе расчетов различных отказов находилась в интервале **4,65 · 10⁻⁵… 0,015 с**. «Скорость» расчетов возрастала в 3 - 4 раза **после прохождения первой амплитуды колебаний**.

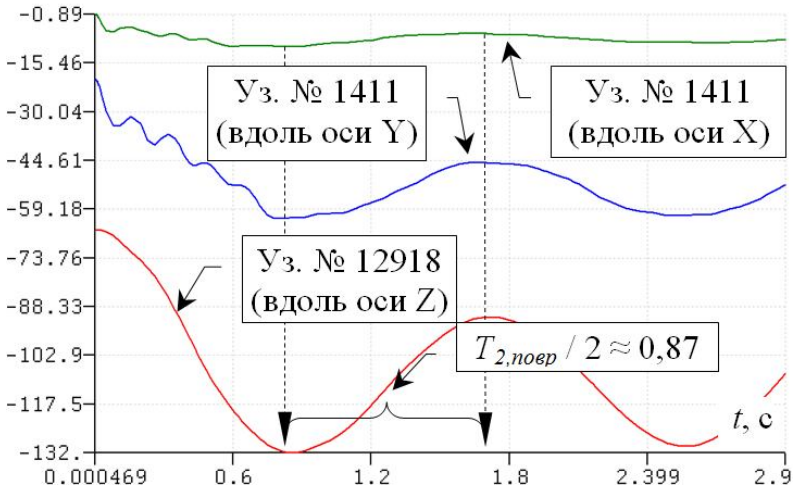
ВРЕМЯ РАСЧЕТА ОДНОГО ОТКАЗА НА «ОБЫЧНОМ» КОМПЬЮТОРЕ – 1.5…2 ЧАСА.

При отказе оттяжки наблюдается ряд негативных факторов

Результаты численных динамических расчетов отлаженной математической модели **неусиленного** покрытия на ряд тестовых повреждений показывают, что:

А) Существенная величина прогиба покрытия **не может гарантировать надежную фиксацию узла опирания ферм Ф2 на кольцевую балку**. В момент динамической реакции Л-образная опора наклонена в сторону покрытия…





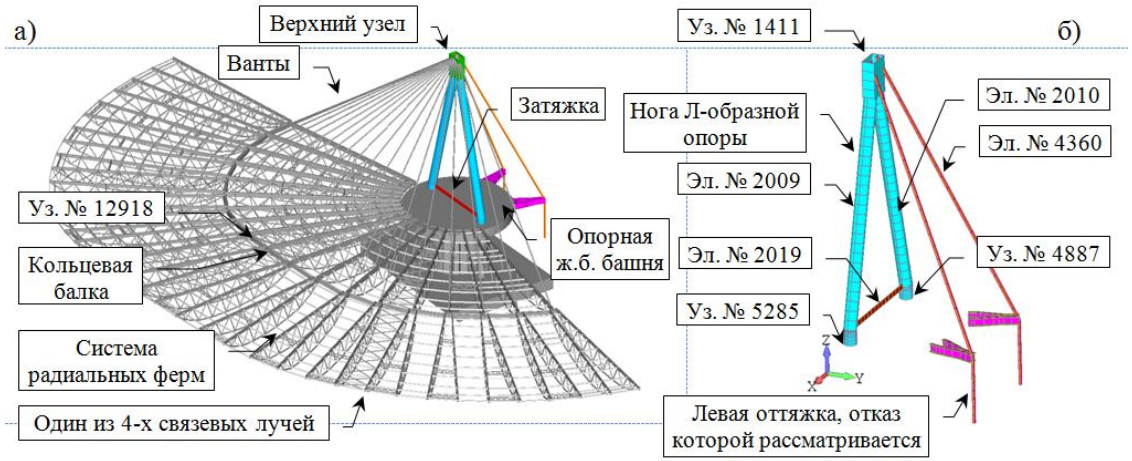
Прогиб кучности покрытия (уз. № 12918) и верха пилона (уз. № 1411), см

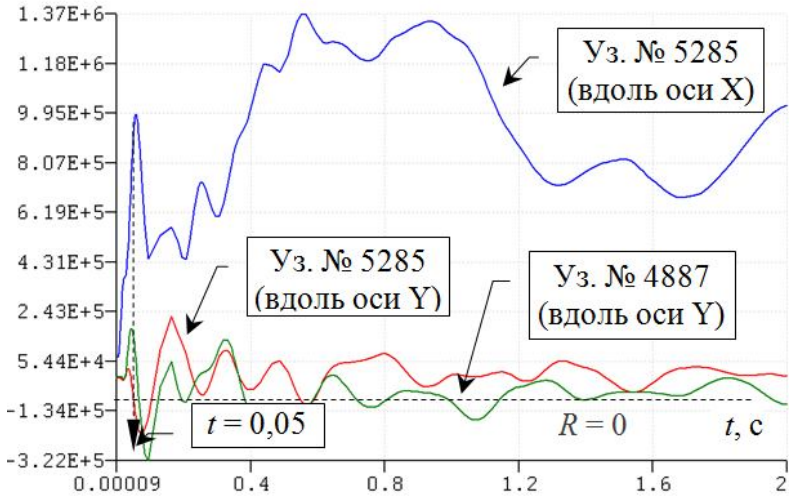
Обычно после прохождения 1-й амплитуды (в нашем случае 0.8 сек) можно дальше «не считать»

При отказе оттяжки наблюдается ряд негативных факторов

Реализуются **значительные величины горизонтальных реакций** в опорных ногах пилона (в левой ноге 225 тс (до отказа 7 тс), в правой 1325 тс (до отказа 70 тс).

Следует отметить, амплитудные значения разных параметров (усилий, напряжений, опорных реакций) достигаются в поврежденном сооружении **в разные моменты времени после отказа**. Первый амплитудный отклик по вертикальному прогибу покрытия, напряжениям в правой оттяжке, затяжке достигается в районе 0,8 с – такое время реакции близко к половине периода колебаний по второй частоте поврежденного сооружения (1 / 0,57 / 2 ≈ 0,87 с). **Но амплитудные значения горизонтальных, вертикальных реакций происходят гораздо раньше – в момент времени около 0,05 - 0,1 с после отказа…**





Горизонтальные реакции ног пилона вдоль осей X и Y, кгс

Эффект, который нельзя «поймать» при квазистатическом расчете (статическом расчете с единым для всех параметров НДС коэффициентом динамичности)

…при этом **коэффициент динамичности** для горизонтальных реакций вдоль оси Y **достигает значительных величин** $k_{дин,max}$ = 26 (левая нога), $k_{дин,max}$ = 6 (правая нога) в сравнении с величиной $k_{дин,max}$ = 1,2…1,45 для остальных важных с инженерных позиций параметров НДС (прогиб кучности покрытия, напряжение в затяжке, оттяжке и т. д.).

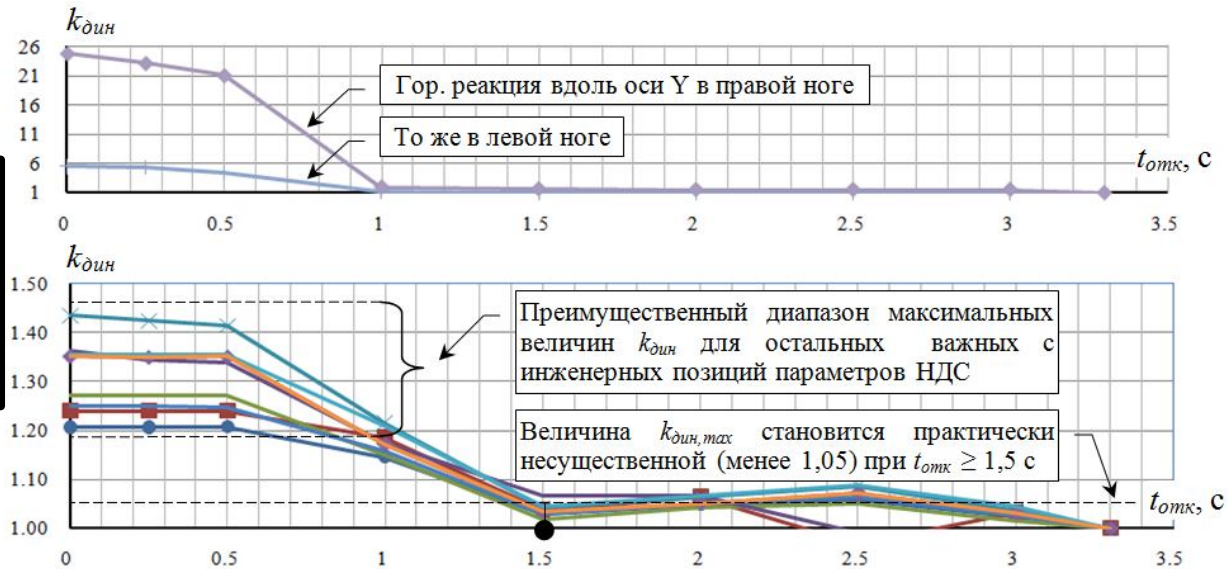
Разница в скорости реакции (времени отклика) и значении $k_{дин}$ объясняется:

а) тем, **что в сооружении есть значительные перепады жесткости между отдельными частями**: конструкция Л-образной стойки является более «динамически» жесткой в направлении ног, чем покрытие в перпендикулярном ему направлении, движение которого зависит от «скорости» кинематического вращения пилона вокруг своих опор. Для ног важна их «продольная» жесткость – продольные колебания распространяются «быстрее», чем колеблется и даже скорее частично вращается покрытие;

б) **кратковременным обратным ударом** по ногам пилона силой, действовавшей в отказавшей оттяжке.

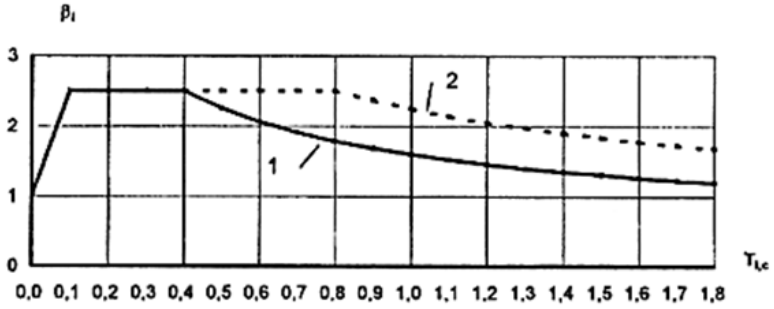
Не подтвердилось предположение, что при времени отказа, отличном от заданной величины (0,001 с), возможны «более неблагоприятные» последствия. Для (не)подтверждения была выполнена серия расчетов при варьировании $t_{отк}$ = 0,001…3,5 с, т. е. при $t_{отк} \approx (0{,}57 \cdot 10^{-5} - 2) \cdot T_{2,повр}$, где $T_{2,повр}$ – период колебаний поврежденного сооружения по второй частоте. Особенность полученных графиков коэффициентов динамичности – убывающий характер – свидетельствует, что наибольшие величины НДС реализуются при величине $t_{отк}$, стремящейся к нулю.

Понятие коэффициента динамичности здесь не совсем корректно, скорее следует говорить об эффекте удара



Изменение коэффициента динамичности $k_{дин}$ в зависимости от времени отказа $t_{отк}$

Предположение почему получились такие величины. Вопрос сейсмостойкости-живучести



Динамический коэффициент в зависимости от периода колебаний. Нормы для расчета на сейсмическое воздействие

$$S_{ik}^{j} = K_0 K_1 S_{0ik}^{j}, \quad S_{0ik}^{j} = g m_k^j A K_A \beta_i K_\psi \eta_{ik}^{J},$$

K_1 - коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, принимаемый по таблице 5;

Таблица 5 - Коэффициенты K_1, учитывающие допускаемые повреждения зданий и сооружений

Тип здания или сооружения	Значения K_1
1 Здания и сооружения, в конструкциях которых повреждения или неупругие деформации не допускаются	1
2 Здания и сооружения, в конструкциях которых могут быть допущены остаточные деформации и повреждения, затрудняющие нормальную эксплуатацию, при обеспечении безопасности людей и сохранности оборудования, возводимые:	
из деревянных конструкции	0,15
со стальным каркасом без вертикальных диафрагм или связей	0,25
то же, с диафрагмами или связями	0,22
из железобетонных крупнопанельных или монолитных конструкций	0,25
из железобетонных объемно-блочных и панельно-блочных конструкций	0,3
с железобетонным каркасом без вертикальных диафрагм или связей	0,35
то же, с заполнением из кирпичной или каменной кладки	0,4
то же, с диафрагмами или связями	0,3
из кирпичной или каменной кладки	0,4
3 Здания и сооружения, в конструкциях которых могут быть допущены значительные остаточные деформации, трещины, повреждения отдельных элементов, их смещения, временно приостанавливающие нормальную эксплуатацию при наличии мероприятий, обеспечивающих безопасность людей	0,12
Примечание - Отнесение зданий и сооружений к 1 и 3 типам проводится заказчиком по представлению генпроектировщика.	

Консольные конструкции, масса которых по сравнению с массой здания незначительна (балконы, козырьки, консоли для навесных стен и т.п. и их крепления), следует рассчитывать на вертикальную сейсмическую нагрузку при значении $\beta\eta$ **= 5.**

Пункт 4 СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах». При назначении зон пластических деформаций и локальных разрушений следует принимать конструктивные решения, снижающие риск прогрессирующего разрушения сооружения или его частей и обеспечивающие **«живучесть»** сооружений при сейсмических воздействиях.

Не следует применять конструктивные решения, допускающие обрушение сооружения в случае разрушения или недопустимого деформирования одного несущего элемента.

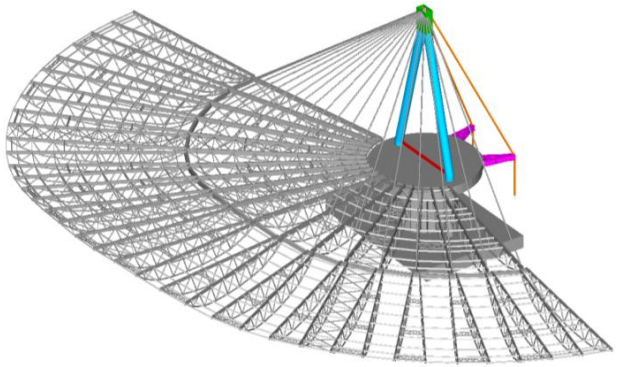
Примечание - При выполнении расчетных и конструктивных требований настоящего СП расчетов на прогрессирующее обрушение зданий и сооружений не требуется.

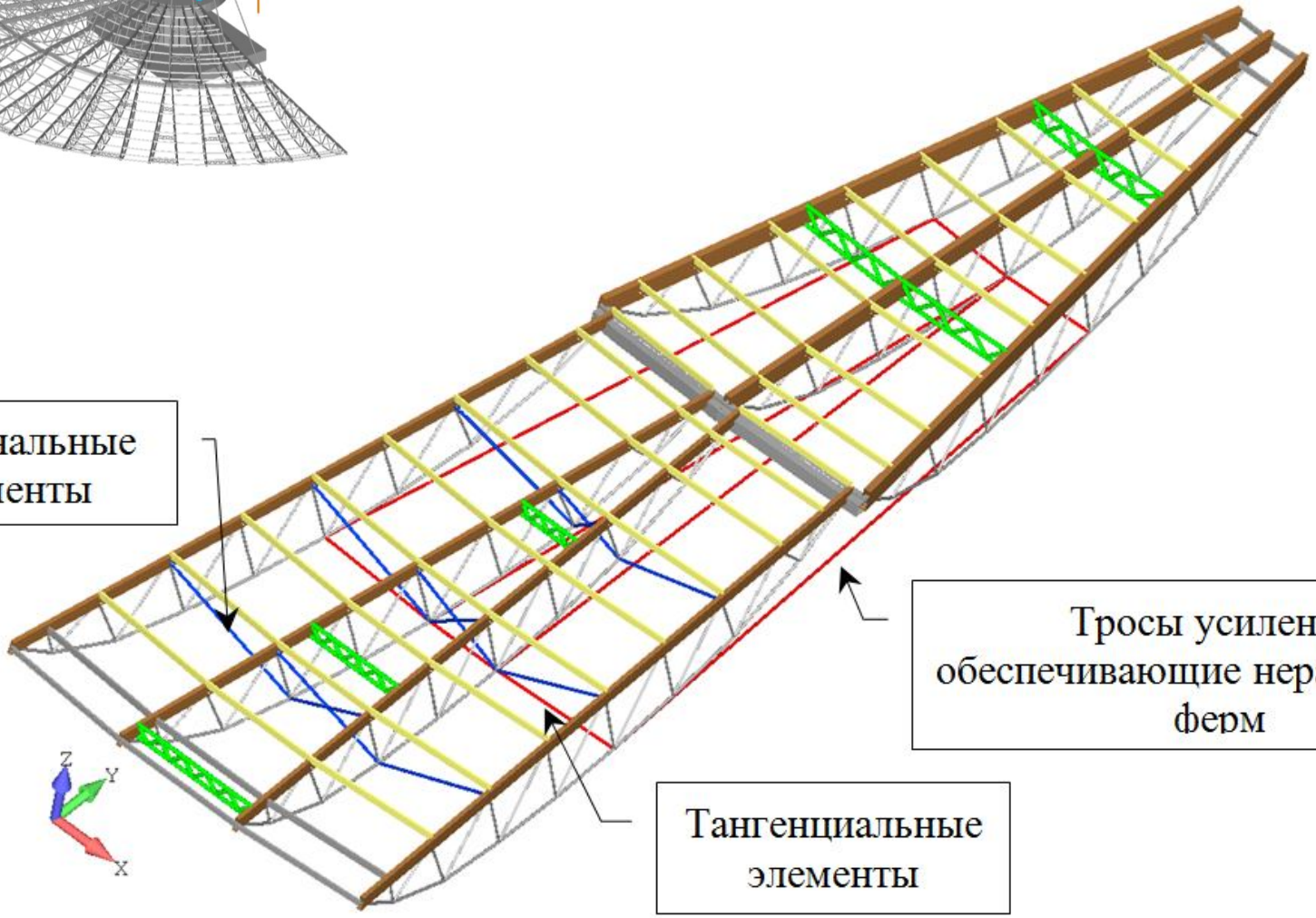
5.2 При выполнении расчетов сооружений с учетом сейсмических воздействий следует использовать две расчетные ситуации:

а) сейсмические нагрузки соответствуют уровню ПЗ (проектное землетрясение). Целью расчетов на воздействие ПЗ является предотвращение частичной или полной потери эксплуатационных свойств сооружением. Расчетные модели сооружений следует принимать соответствующими упругой области деформирования. Расчеты зданий и сооружений на особые сочетания нагрузок следует выполнять на нагрузки, определяемые в соответствии с 5.5, 5.9, 5.10;

б) сейсмические нагрузки соответствуют уровню МРЗ (максимальное расчетное землетрясение). Для определения расчетных сейсмических нагрузок следует использовать карты ОСР-97-В для сооружений, перечисленных в графе 2 таблицы 3, и карты ОСР-97-С для сооружений, перечисленных в графе 1 таблицы 3. Формирование расчетных моделей сооружений следует проводить с учетом возможности развития в несущих и ненесущих элементах **конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений**. Расчеты следует выполнять с учетом требований 5.2.2.

Идея усиления заключается в увеличении неразрезности – создании из статически определимого покрытия подобия пространственной плиты





Дополнительные материалы можно найти в разделе публикации на сайте www.905505.ru