

# Из опыта проектирования реальных объектов: проблемы и решения



**Доклад ставит своей целью обсудить два основных и практически бесспорных тезиса:**

**Тезис 1:**

**Опыт выполнения практических расчетов на нестандартных и сложных объектах, зачастую приводит к постановке некоторых задач исследовательского характера.**

**Тезис 2:**

**Анализ непонятных и непривычных результатов расчета, возникающих при проектировании объектов нетрадиционной конструкции, обогащает опыт использования программной системы.**

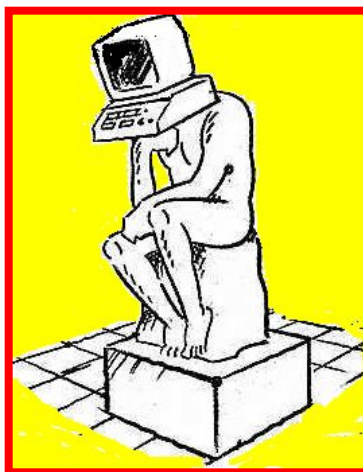
**Все дальнейшее изложение иллюстрирует эти два тезиса и основано на опыте реального проектирования. Мы полагаем, что обмен таким опытом является полезным.**

При подготовке доклада использовались материалы, полученные при расчетах нового безопасного конфейнмента Чернобыльской АЭС (Скад Софт и УкрНИИПСК), разборе проблемных задач, присылаемых пользователями вычислительного комплекса СКАД, а также некоторые данные из технической периодики.

Проблемы

Проблемы

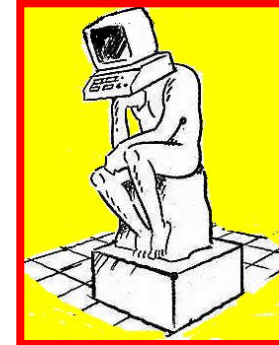
Проблемы



Решения

Решения

Решения

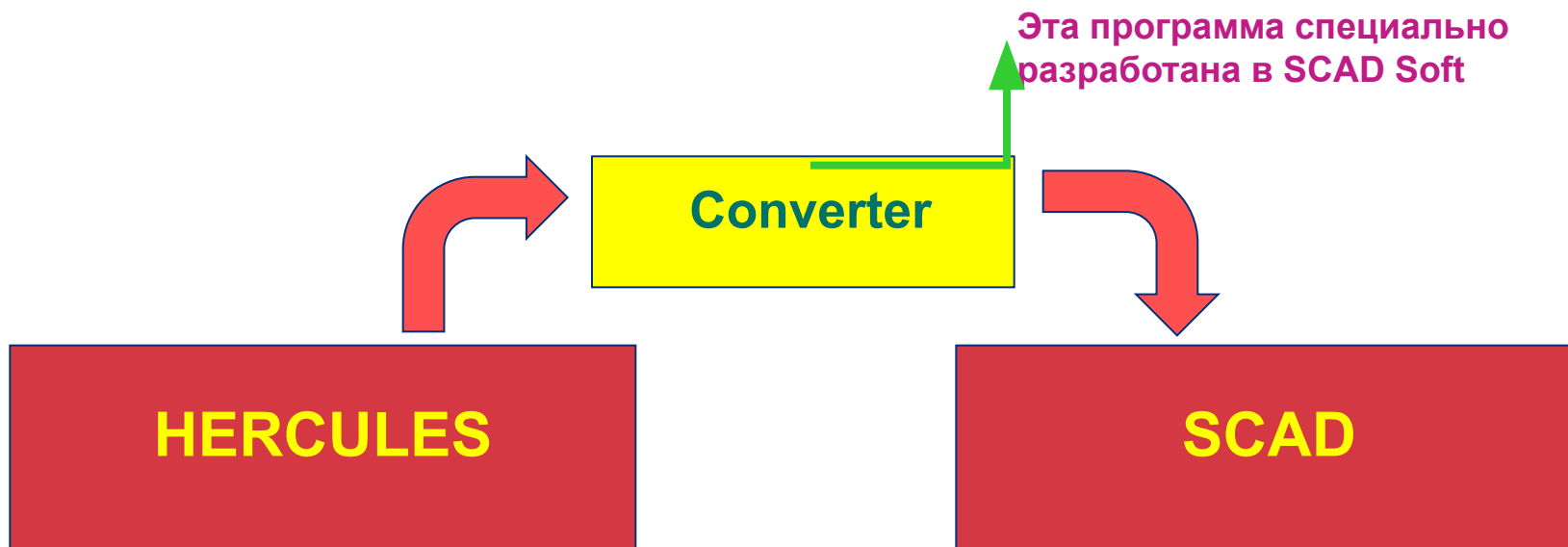


## Тема 1: Дублирование расчетов и сопоставление результатов

Выполнение расчетов по двум независимым программам и расчетным моделям становится практическим стандартом для сложных объектов. О проблемах, возникающих при этом, уже не раз говорилось. Мы здесь остановимся на одной из них – методике сопоставления результатов.

Для одного из объектов использовались расчетные модели французской фирмы Cabinet JAILET-ROUBY, которая выполняла расчеты конструкций по программе HERCULES, и НПО СКАД Софт, выполнявших расчеты по программе SCAD..

Было выполнено конвертирование данных.



В связи с использованием конвертации модели должны были полностью совпадать по геометрическим параметрам (координаты узлов, размеры и форма поперечных сечений элементов и т.п.), однако это не исключало проверки.

В основном, она выполнялась выборочно для выявления только грубых ошибок. Жесткостные параметры проверялись с помощью режима SCAD «Спектр жесткостей» .

Основным было сопоставление результатов расчета на несколько контрольных нагружений.

Наибольшие расхождения, подсчитываемые как соотношение

$$\Delta_X = 100 \cdot \frac{|X_1 - X_2|}{X_1}$$

соответствовали малым значениям усилий или перемещений (в районе нуля все такие оценки велики).

Элемент	Сечение	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Δ <sub>N</sub>
1	1	-220,0	-222,4	1,073
1	2	-14,9	-12,1	18,403
3	1	-460,9	-462,2	0,281
3	2	61,7	58,7	4,891
12	1	-56,8	-53,6	5,582
12	2	2,3	2,1	9,582

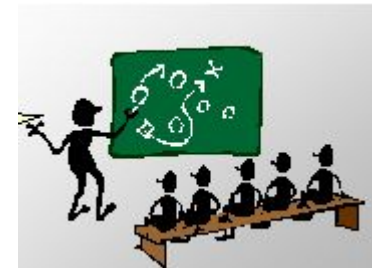
Логичнее сопоставлять нормированные величины

$$\Delta_{0N} 100 \left( \frac{|N_{01} - N_s|}{AR_d} \right)$$

$$\Delta_{0M} 100 \left( \frac{|M_E - M_R|}{WR_d} \right)$$

Тогда расхождения становятся физически значимыми, а не формальными.

Элемент	Сечение	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Δ <sub>N</sub> , %	Δ <sub>0N</sub> , %
1	1	-220,0	-222,4	1,073	0,166
1	2	-14,9	-12,1	<b>18,403</b>	<b>0,262</b>
3	1	-460,9	-462,2	0,281	0,168
3	2	61,7	58,7	4,891	0,181
12	1	-56,8	-53,6	5,582	0,380
12	2	2,3	2,1	9,582	0,031



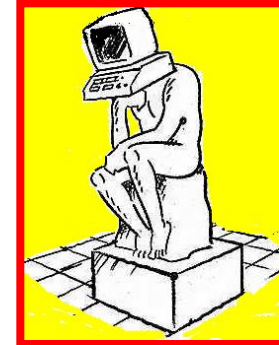
**ИТАК:**

- 1. Можно повсеместно рекомендовать при сопоставления результатов в качестве измерителя расхождений использовать разность результатов, нормированную на значение несущей способности.**
- 2. Необходимо выработать аналогичный, физически значимый измеритель для сопоставления перемещений.**
- 3. В нормативных документах, где регламентируются сопоставительные расчеты, необходимо также указывать допустимую величину расхождения результатов. Так сделано в новых украинских нормах по проектированию высотных зданий.**



**Есть ли вопросы ?**





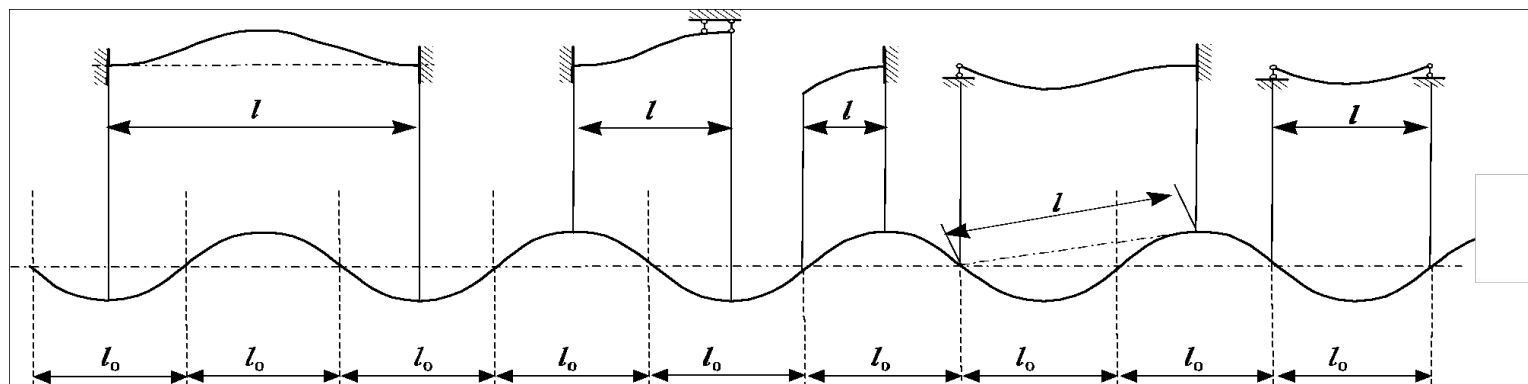
## Проблема 2: Расчет на устойчивость и проблема расчетных длин

Понятие расчетной (свободной, эквивалентной) длины было введено более ста лет тому назад Ф.С. Ясинским с целью обобщения формулы Эйлера на случай центрального сжатия линейно упругого плоского стержня с произвольными закреплениями концов.

Следуя Ф.С. Ясинскому под расчетной длиной стержня обычно понимают условную длину однопролетного стержня, критическая сила которого при шарнирном закреплении его концов такая же, как для заданного стержня.

Это определение часто забывают и тогда возникают ненужные вопросы.

Было замечено, что если подобрать длины стержней  $l$  каждого из этих «стандартных» стержней так, чтобы критическая сила у них оказалась одинаковой, то формы потери устойчивости можно рассматривать как различные участки дуги одной и той же синусоиды



Но все это относится только к плоским расчетным моделям и только к плоским схемам деформирования. Только для них имеет смысл рассмотрение расстояния между точками перегиба изогнутой оси в качестве расчетной длины.

Теперь представим себе пространственный шарнирно опертый в обоих главных плоскостях стержень у которого поперечное сечение имеет моменты инерции  $I_x$  и  $I_y = 4I_x$ . При центральном сжатии такой стержень теряет устойчивость при нагрузке

$$P_{cr,x} = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2} \quad (l_{0,x} = l)$$

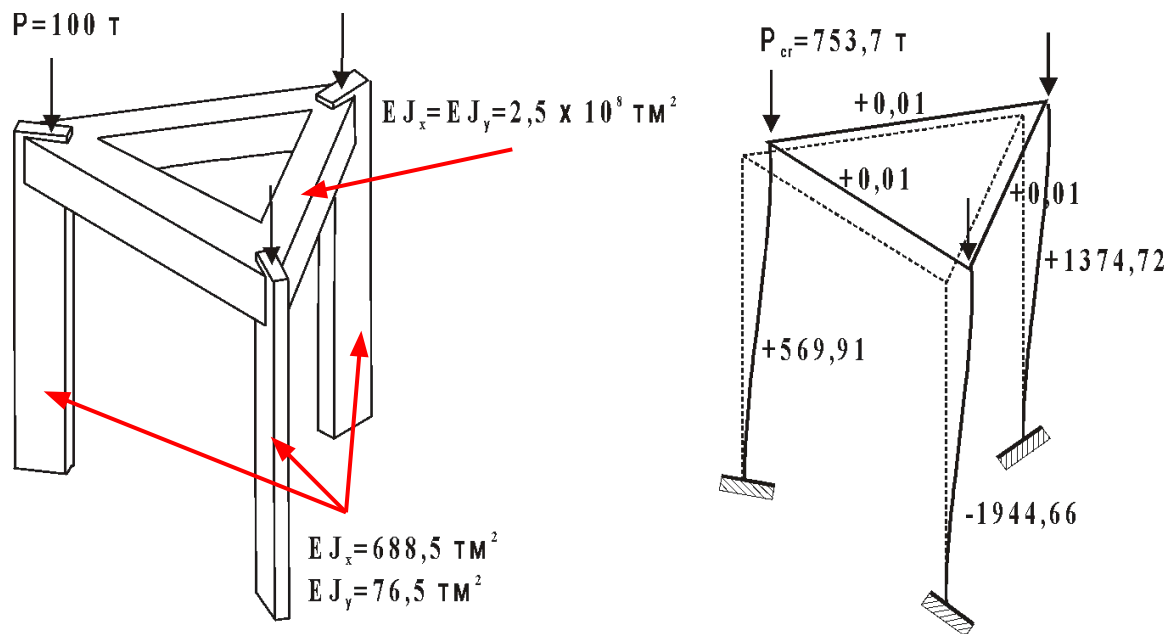
Если теперь формально найти расчетную длину  $l_{0,y}$  такую, чтобы потеря устойчивости и в этой плоскости происходила бы при том же значении нагрузки, то из равенства

$$\frac{\pi^2 E(4I_x)}{l_{0,y}^2} = P_{cr,x} = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2}$$

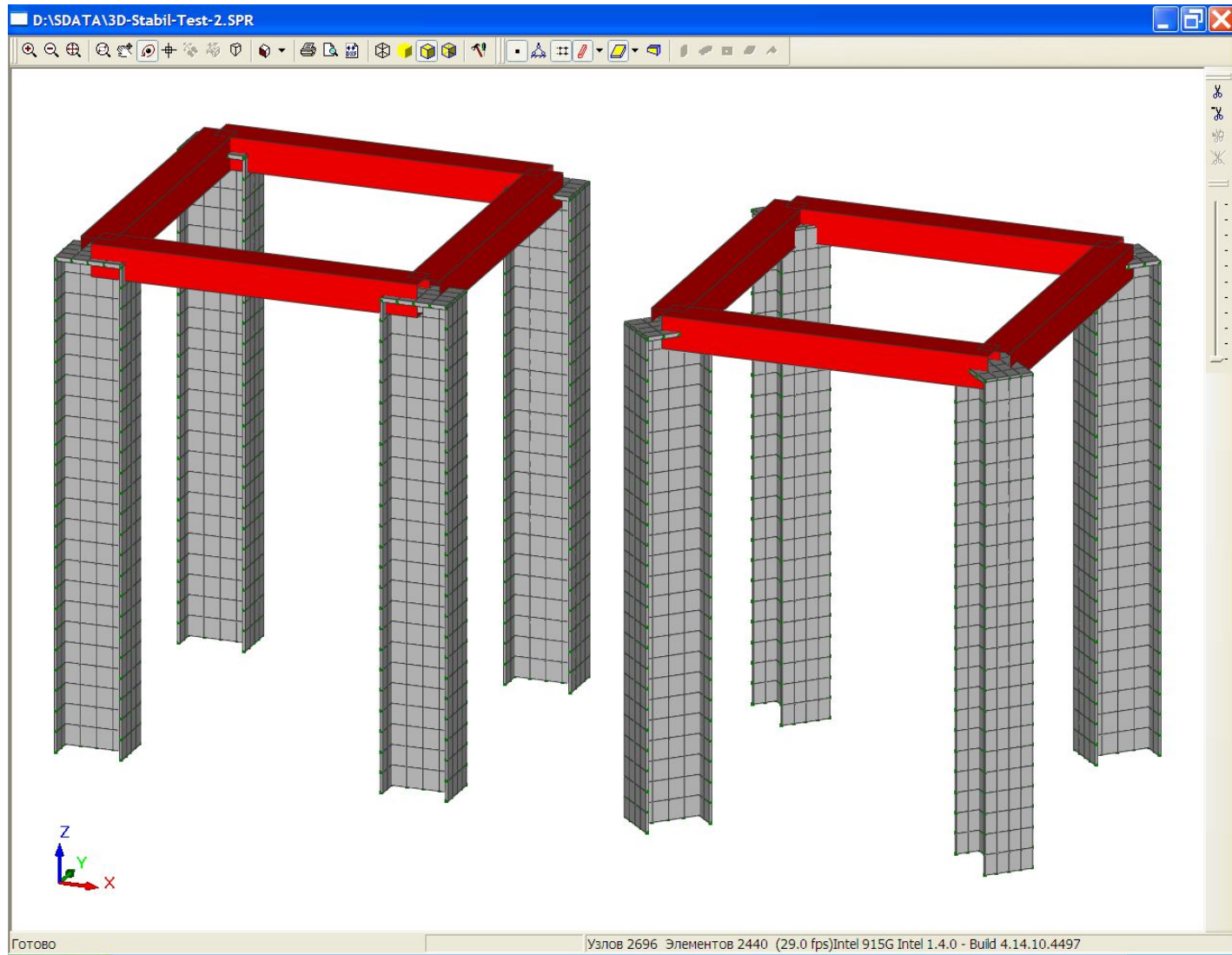
будет следовать, что  $l_{0,y} = 2l$  хотя, исходя из условий шарнирного опирания концов, казалось бы, что должно быть  $l_{0,y} = l$ .

По-видимому авторы норм предполагают, что практикующие инженеры должны действовать следующим способом: выполнить два расчета на устойчивость в которых попеременно запрещается деформирование то в одной, то в другой главной плоскости инерции (например, полагая то  $I_x = \infty$ , то  $I_y = \infty$ ) и из них определяются коэффициенты расчетной длины  $\mu_x$  и  $\mu_y$ .

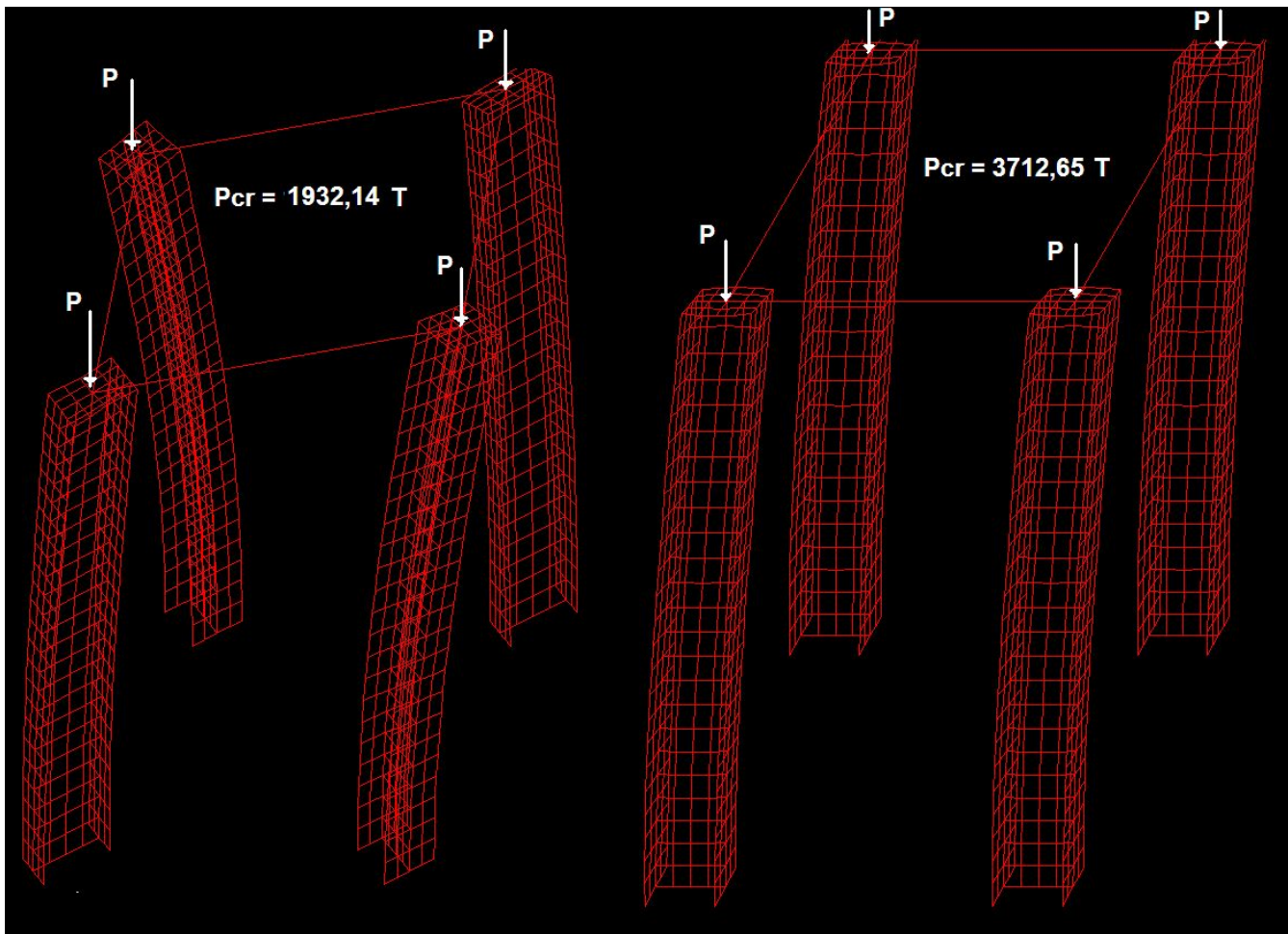
Но и этот рецепт не срабатывает если главные оси инерции различных стержней не параллельны друг другу



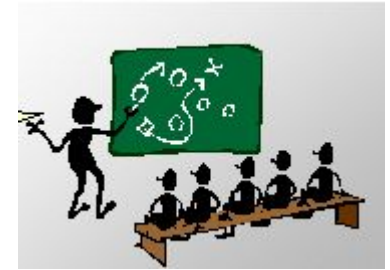
Полезно рассмотреть еще один пример.



Вот результаты расчета:



Получается, что только разворот стоек изменил их расчетную длину почти вдвое.

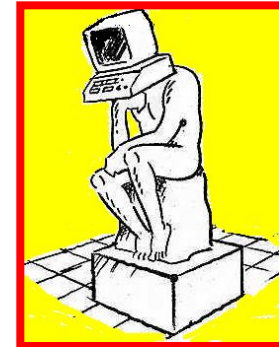


## ИТАК:

1. Расчетные длины стержневых элементов, определенные в строгом соответствии с теорией, могут оказаться «странными» если рассчитывается пространственная конструкция.
2. Нормы проектирования, к сожалению, не рассматривают случай пространственных систем (исключение – элементы башенного сооружения типа опоры ЛЭП).
3. В некоторых случаях можно получить требуемые результаты, выполнив специальный расчет с сильно завышенными геометрическими характеристикам для плоскостей минимальной жесткости, что заставит систему деформироваться в плоскости максимальной жесткости.

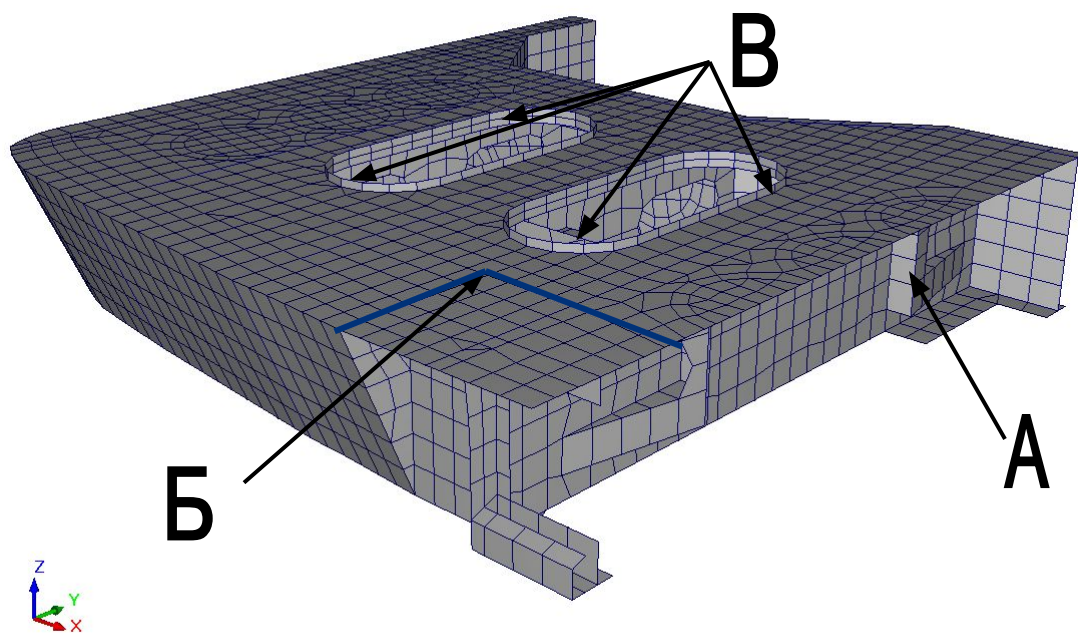


Есть ли вопросы ?



## Тема 3: Особенности проверки сходимости результатов

Эта тема инициировалась письмом пользователя, который был неудовлетворен анализом сходимости результатов в такой задаче:



Эквивалентное напряжение,  
МПа

Размер КЭ, мм	Зона А	Зона Б	Зона В
50	398	488	395
25	544	720	513
12,5	783	921	589
6	1100	1292	773



## 3.1. Сгущение конечно-элементной сетки

Для проверки точности решения получаемого методом конечных элементов используется метод сгущения сетки.

Этим подходом и воспользовались авторы упомянутого письма. Но здесь есть несколько подводных камней, которые связаны с ответом на следующие вопросы:

- а) какие результаты можно сопоставлять;
- б) как следует следить за геометрией объекта;
- в) насколько можно сгущать сетку.

Ответы будем иллюстрировать примерами.

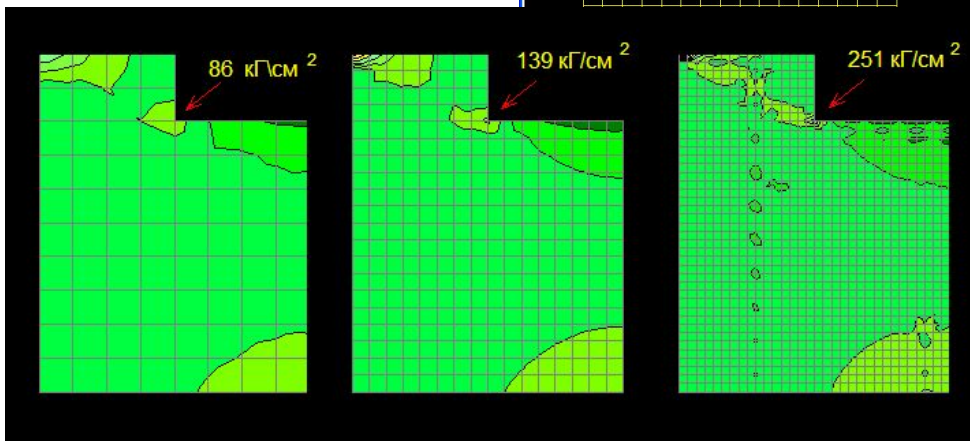
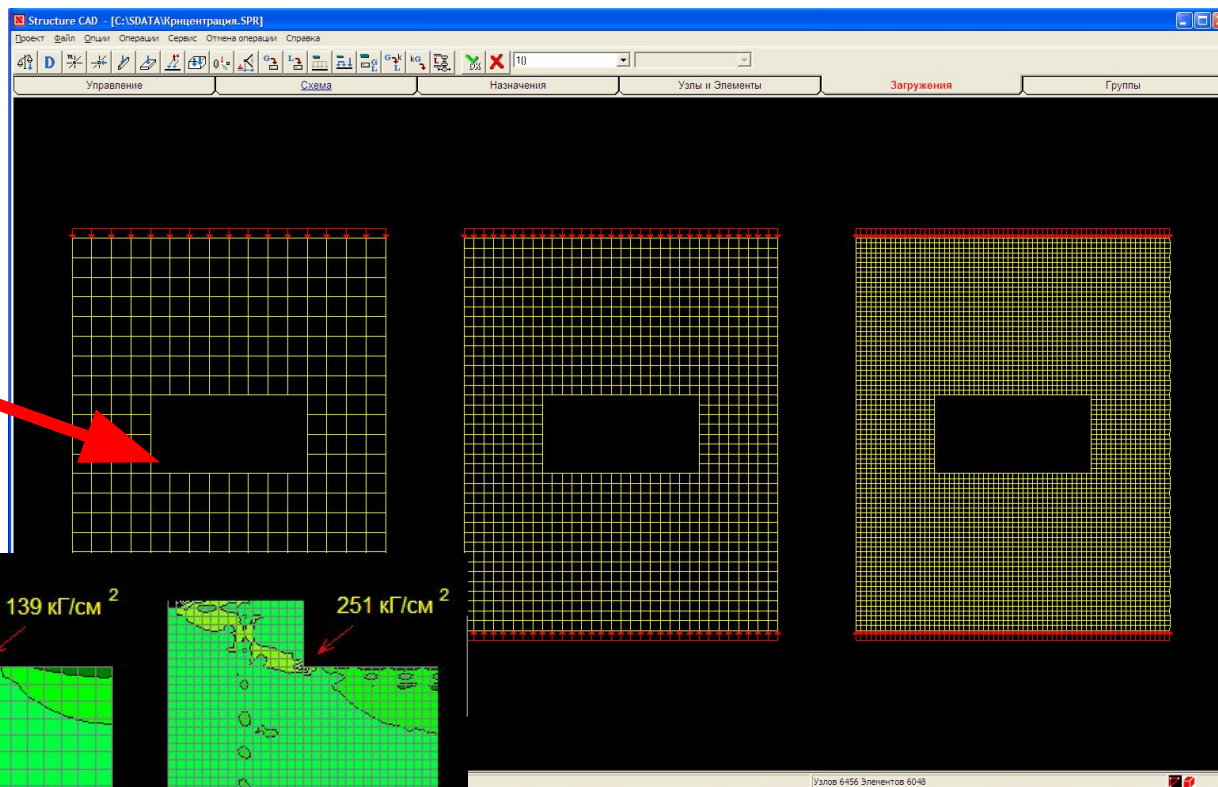
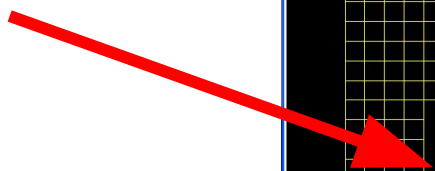
## а) Какие результаты можно сопоставлять;

В теории метода четко говорится о том, что сходимость МКЭ обеспечивается далеко не по всем компонентам НДС.

Наименование элемента	Показатель степени в оценках скорости сходимости по:			
	перемещениям	напряжениям	моментам	поперечным силам
Прямоугольный элемент плоской задачи теории упругости	2	1	—	—
Треугольный элемент плоской задачи теории упругости	2	1	—	—
Четырехугольный (от 4 до 8 узлов) элемент плоской задачи теории упругости	2	1	—	—
Прямоугольный элемент оболочки	2	1	1	0
Треугольный элемент оболочки	2	1	1	0
Четырехугольный элемент оболочки	2	1	1	0
Четырехугольный (от 4 до 8 узлов) конечный элемент оболочки	2	1	1	0

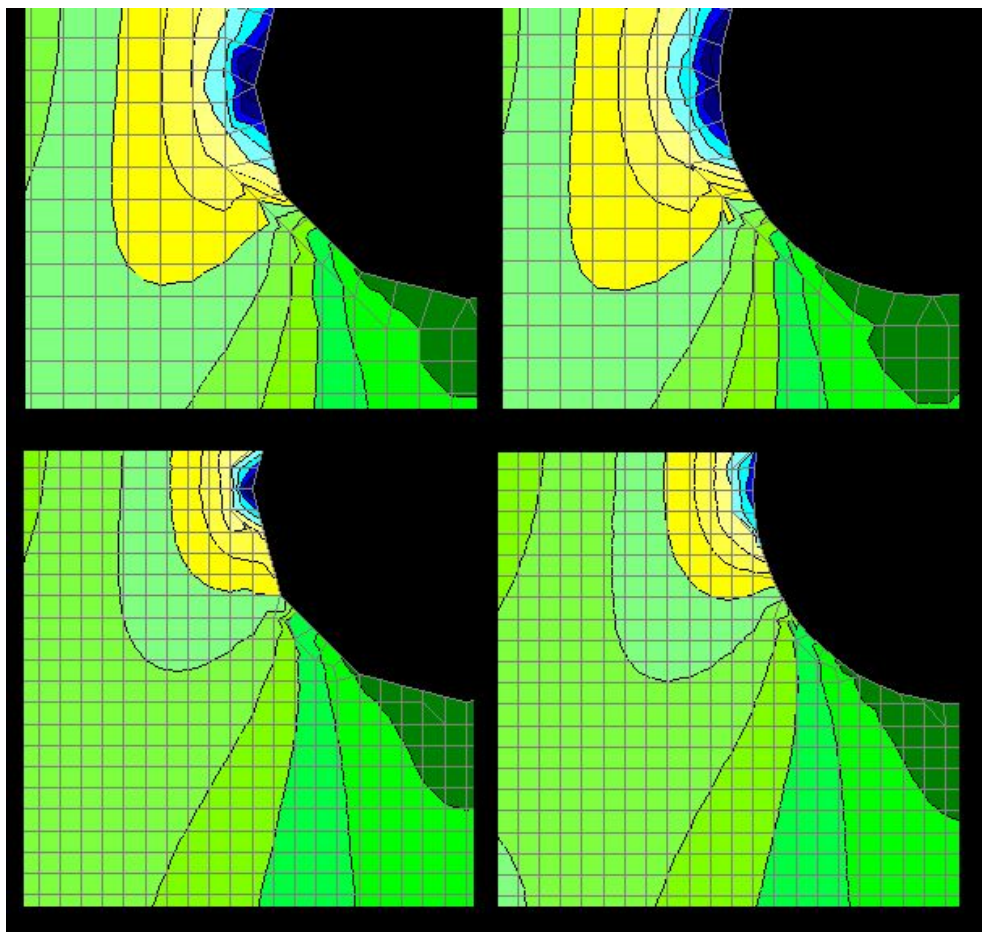
Конечно, не стоит сопоставлять компоненты НДС, для которых отсутствует теоретически доказанная сходимости (например, поперечные силы в плите).

Но существуют еще и особые точки



То же самое происходит при действии сосредоточенной силы на плиту или оболочку.

## б) Как следует следить за геометрией объекта



В конечно-элементной модели криволинейные поверхности заменяются многогранником, а кривые линии – ломанными. При сгущении сетки следует следить за согласованностью конечно-элементного и геометрического представлений.

## **в) Насколько можно сгущать сетку**

Еще один подводный камень – при сгущении сетки может оказаться, что узлы подошли друг к другу на расстояние, которое меньше чем указанная граница точности совпадения узлов. В таком случае новую сетку нельзя построить и это сразу же станет ясным.

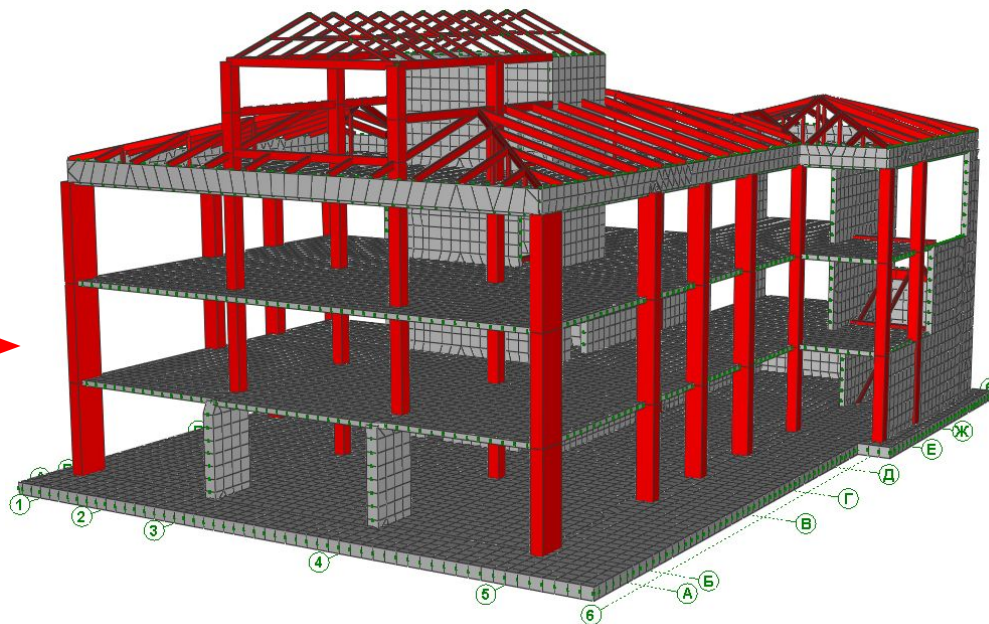
Но хуже будет если узлы новой сетки находятся на достаточном расстоянии и сетка построится, но близкими окажутся узлы не входящие в дробящуюся сетку. Тогда появятся совпадающие узлы, которые могут привести к нежелательным эффектам.

## 3.2. Итерации СКАД → КРОСС → СКАД → ...

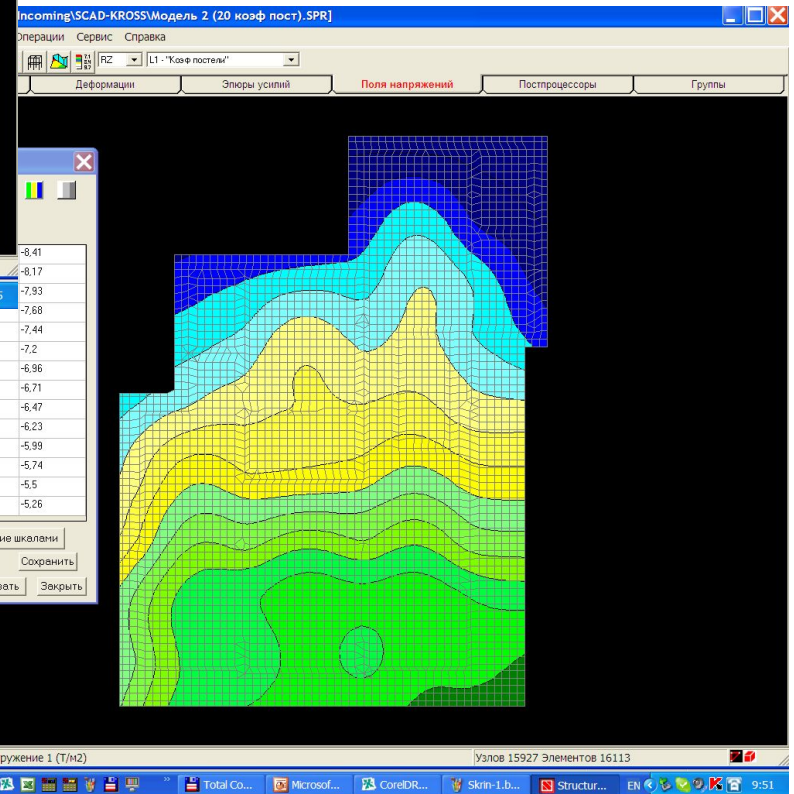
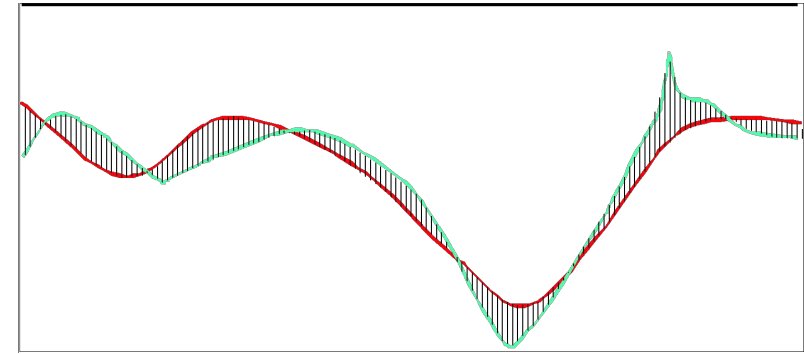
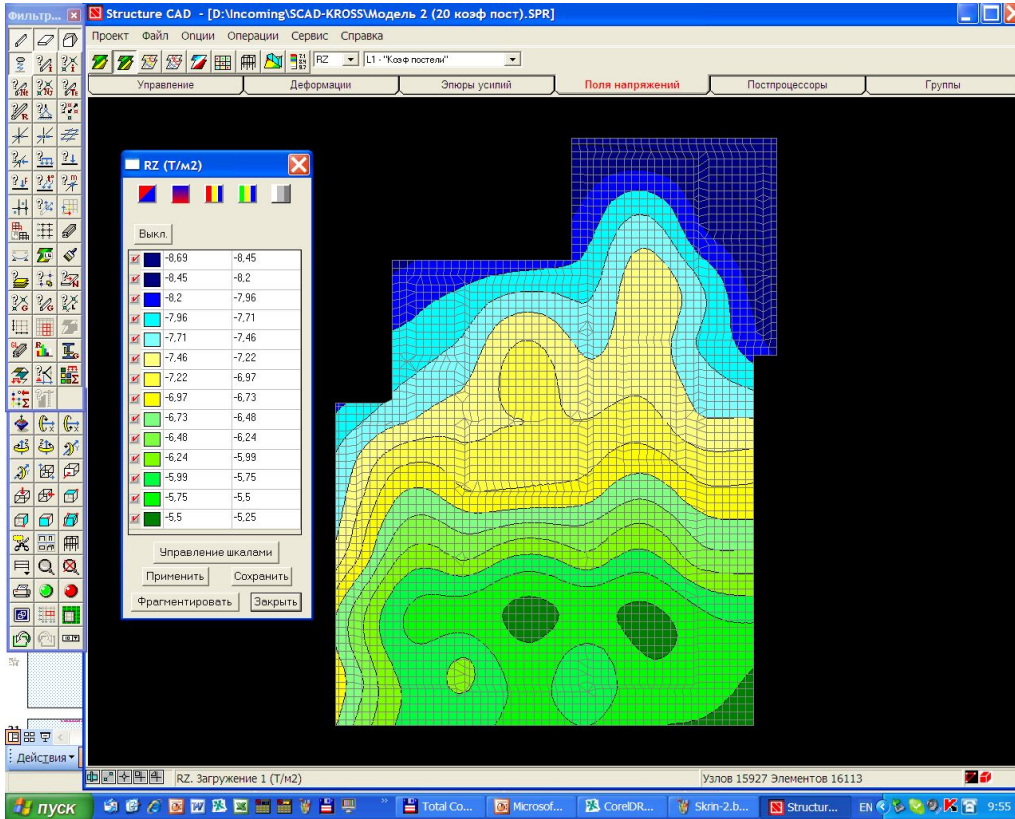
В системе SCAD Office часто используются итерации по указанной схеме. Все время уточняются упругие характеристики основания.

**Но возникает вопрос – когда остановиться?**

Для обоснования  
ответа рассмотрим  
пример



# Сопоставление графиков

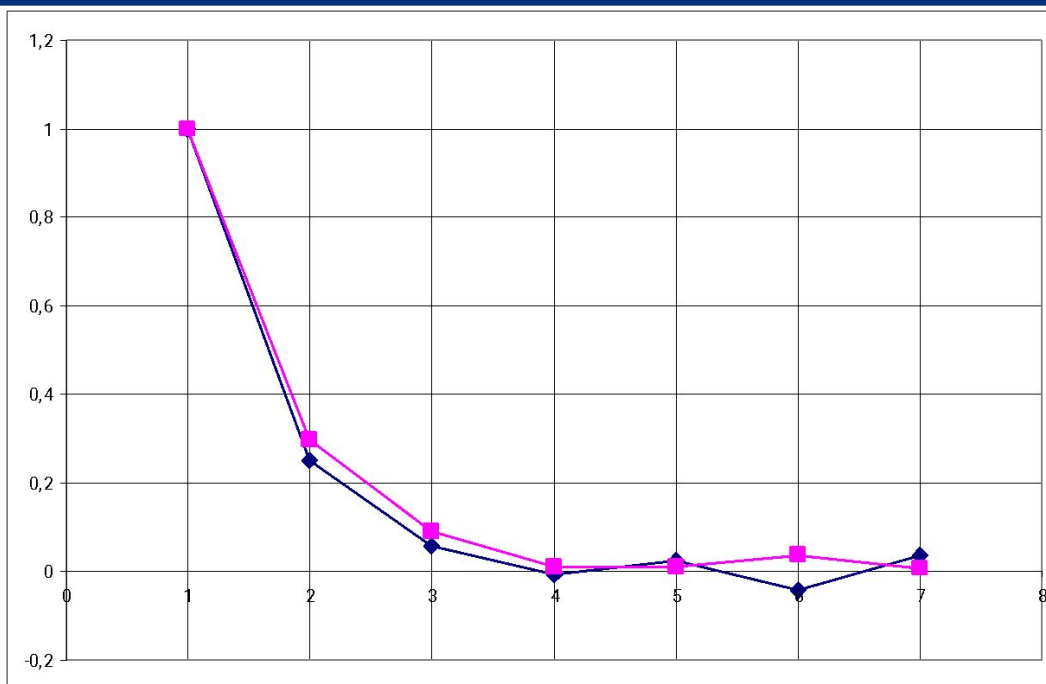


Рекомендация:

$$\Delta = \sum RZ_{i+1} - \sum RZ_i$$

### Значения $\Delta$ на восьми итерациях

5 уровней	127,09	31,70	7,15	0,83	3,30	5,56	4,63
20 уровней	109,35	32,46	9,83	1,21	1,22	3,93	0,63
5 уровней	1	0,249	0,056	0,006	0,025	0,043	0,036
20 уровней	1	0,296	0,089	0,011	0,013	0,035	0,005







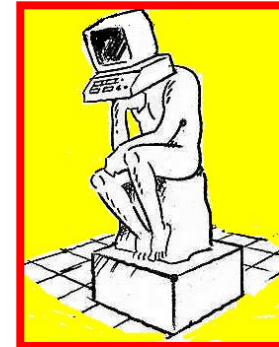
## ИТАК:

1. Следует обращать внимание на наличие особых точек
2. При сгущении сетки следует следить за согласованностью конечно-элементного и геометрического представлений.
3. При дроблении сеток следует проверять, не появились ли совпадающие узлы.
4. При итерационном уточнении упругих свойств основания можно следить за суммарной разностью реакций в конечных элементах плиты. Число уровней значений для выдачи реакций существенной роли не играет.

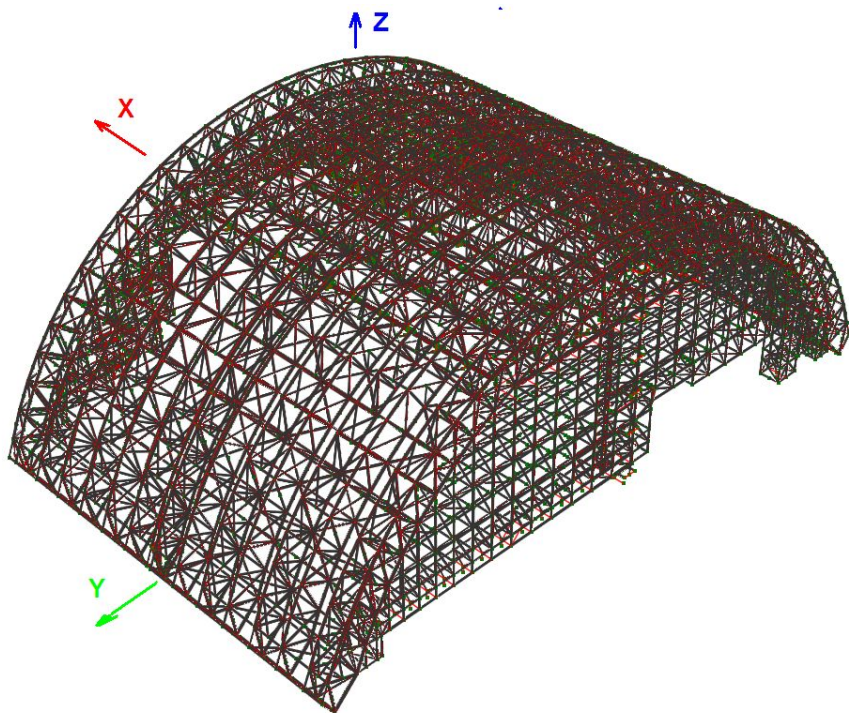


Есть ли вопросы ?

## Тема 4: О большом количестве нагрузений



При расчете НБК мы столкнулись с проблемой очень большого числа вариантов нагружения. Вместо обычного числа в несколько десятков нагружений, пришлось вести расчет на несколько сотен вариантов нагружения:



Постоянные нагрузки – 17  
Полезные - 6  
Ветер - 84  
Снег - 7  
Крановые нагрузки – 324  
Температура – 6 +11  
Сеймика - 12  
Смерч – 196

Итого – 572 варианта

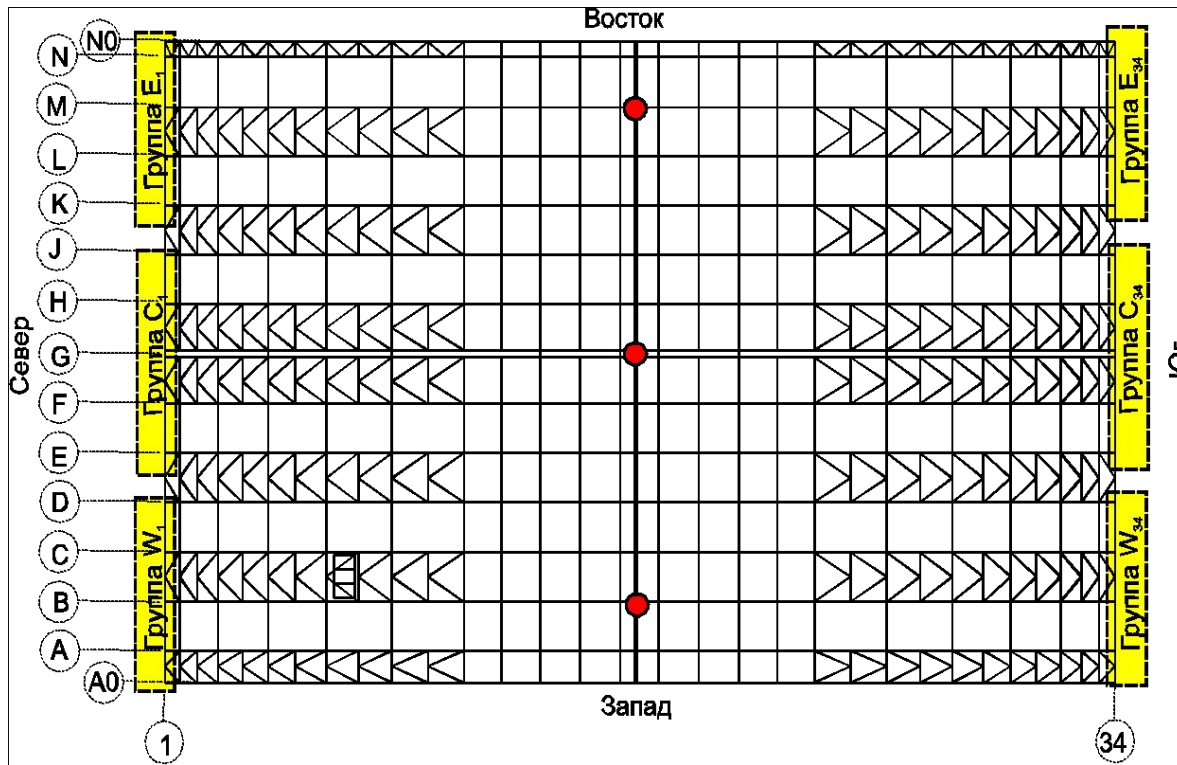
Каково их происхождение?

## 1. ВЕТЕР

В аэродинамической трубе CSTB “Jules Verne” во Франции были испытаны модели НБК для различных стадий возведения. Моделировалась и окружающая обстановка.



Из 36 исследованных направлений определялись опасные по некоторым критериям



Суммарное усилие на фундамент вдоль X, Y, Z :

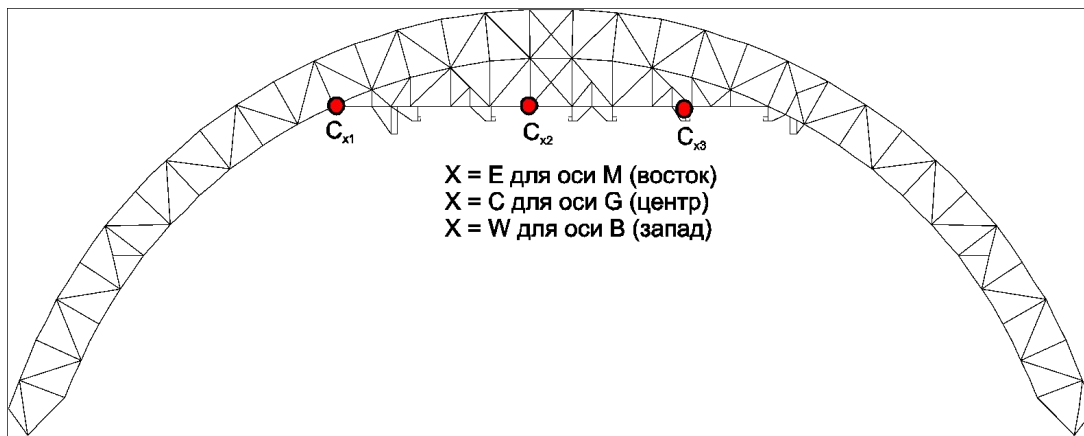
- $E_1$  - нагрузки 1,2,3
- $E_{34}$  - нагрузки 4,5,6
- $C_1$  - нагрузки 7,8,9
- $C_{34}$  - нагрузки 10,11,12
- $W_1$  - нагрузки 13,16,15
- $W_{34}$  - нагрузки 16,17,18

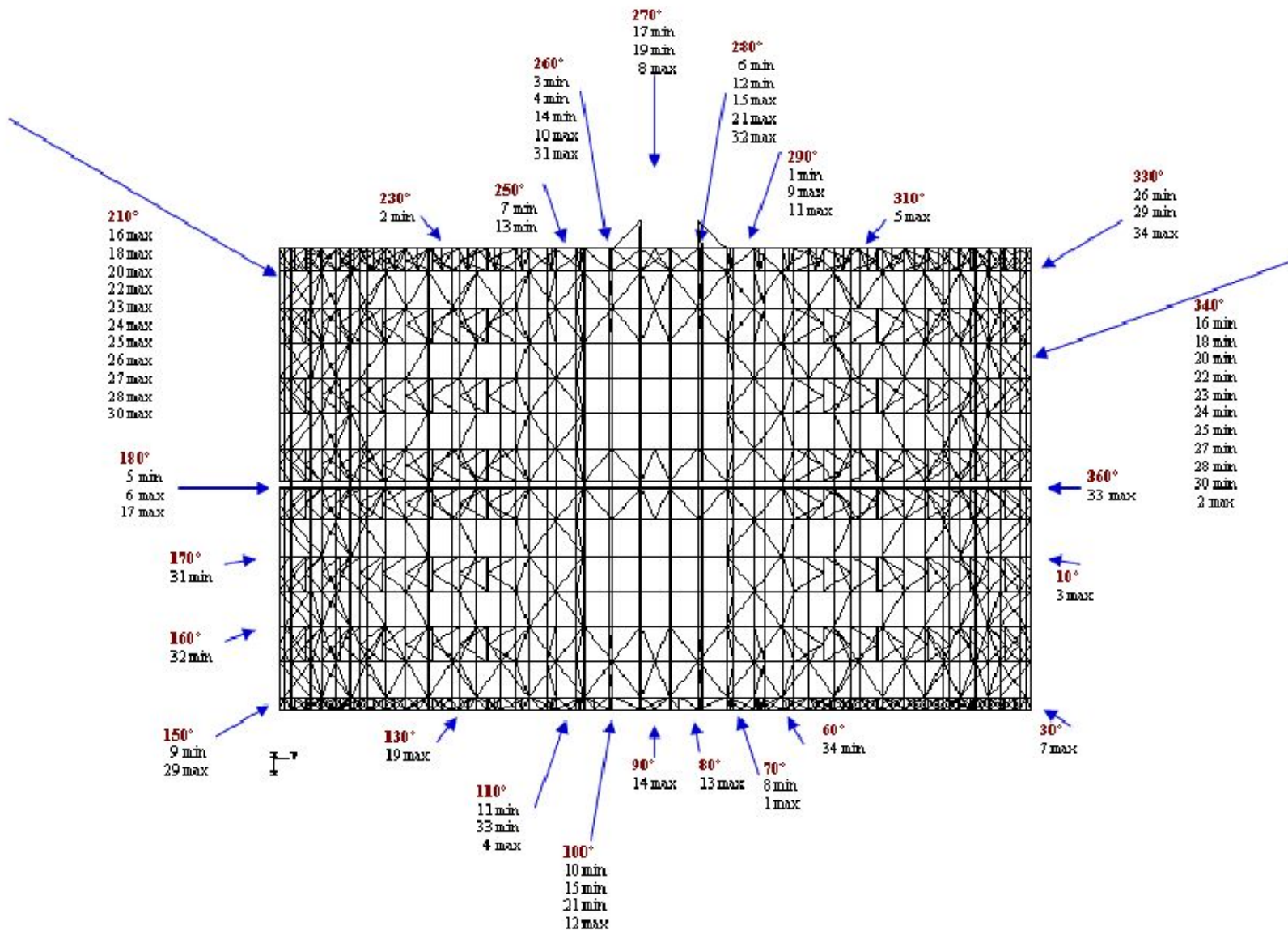
Перемещение вершины арки вдоль X, Y, Z :

- A - нагрузки 19,20,21
- B - нагрузки 22,23,24
- C - нагрузки 25,26,27

Разность смещений опор крана и т д.

Всего 42 критерия



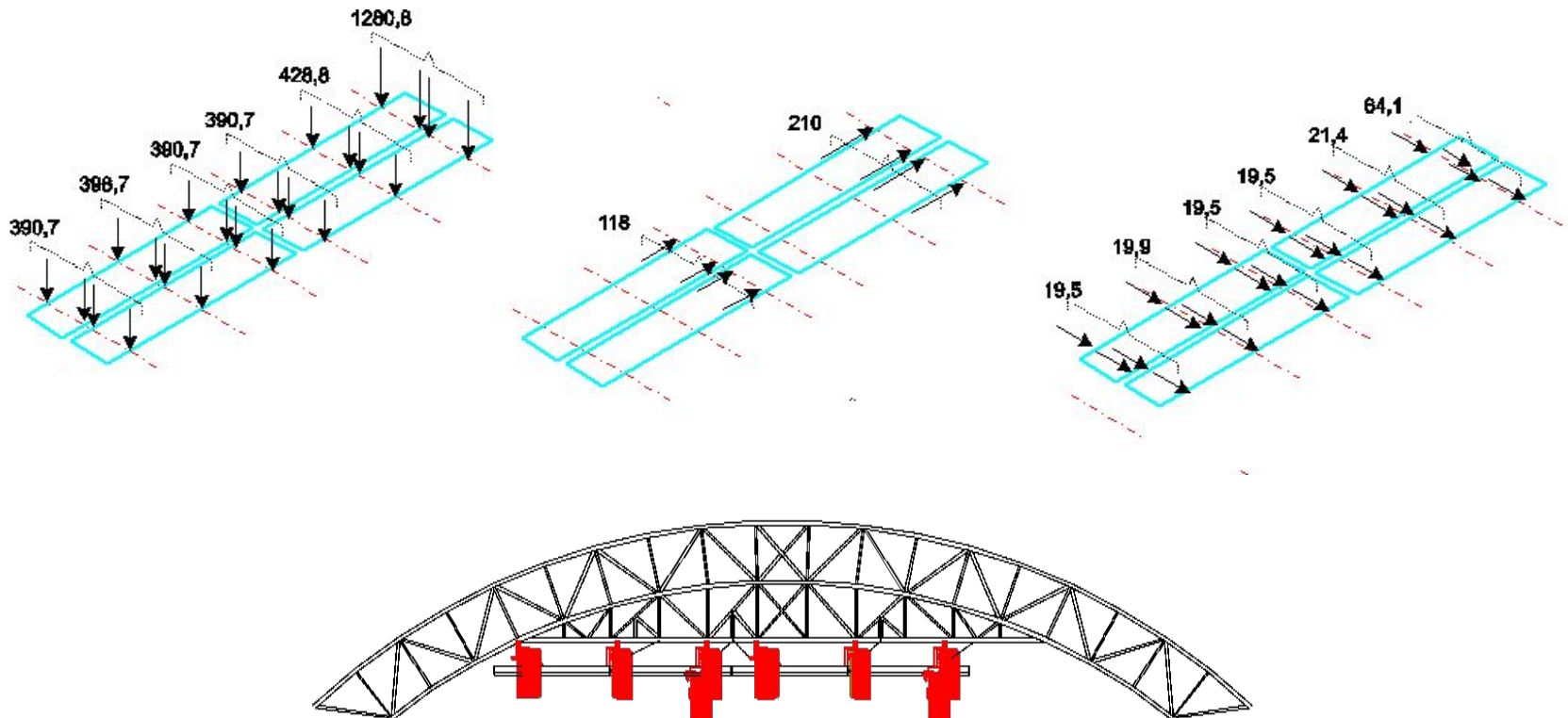


Оказалось, что необходимо рассмотреть 84 нагружения

# КРАНЫ

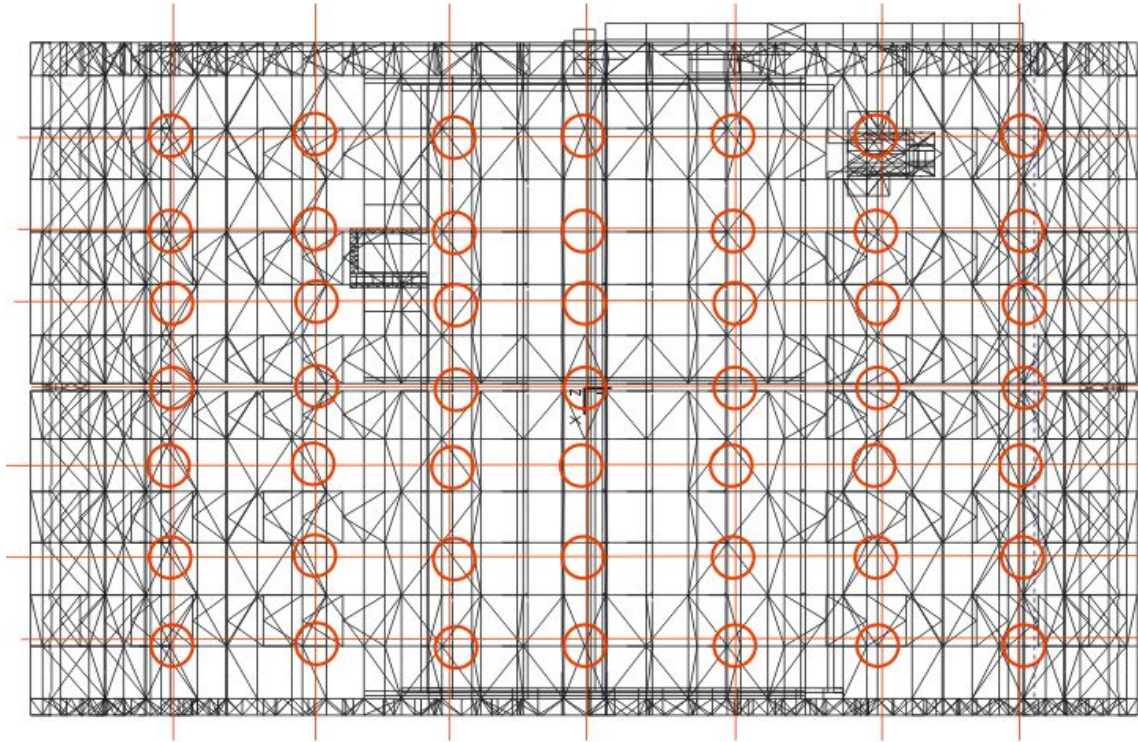
Рассматривалось положение пары сближенных кранов у каждой из 12 арок, кроме того, для каждого расположения моста кранов рассматривались по 9 вариантов расположения крановых тележек.

$$12 \times 9 \times 3 = 324$$



# СМЕРЧ

Рассматривалось 49 возможных позиций расположения оси вихря и в каждой позиции по 4 направления его перемещения



При таком числе нагружений основной проблемой является поиск расчетных сочетаний усилий, на него уходит основное время.

Нужно учитывать, что если имеется серия взаимоисключающих нагружений, то в расчетную комбинацию попадет только одно из них. Это дает возможность при поиске РСУ предварительно обработать взаимоисключения и сократить время счета (так и работает блок РСУ).

**Но такое может случиться если только блок взаимоисключения является квадратным. Для этого группу взаимоисключающих нагружений нужно нумеровать подряд.**



	Номер	Имя нагрузки	1	2	4	...	75	76	...	81	87-120...	121-147	82	83	84...	85-86	148-213	214-315
Постоянная нагрузка	1	Минимальная		+														
	2	Максимальная	+															
Ветровые нагрузки	4	120				+	+											
	...	...			+													
	75	284			+	+												
Снеговые нагрузки	76-78	Предельные								+	+							
										+	+							
Технологические	79-81	Экстремальные								+	+							
Температурные нагрузки	87-120	87-120																
	121-147	121-147																
	82	Темпер. нагр. (+30)																
	83	Темпер. нагр. (+45)																
	84	Темпер. нагр. (-20)																
	85-86	Темпер. нагр. (-35)																
Крановые	148-213	3021-3069																
Крановые	214-315	3071-3129																

Более 10 часов



	Номер	Имя нагрузки	1	2	4	...	75	76	...	81	82	...83	84	85-86	87-120...	121-147	148-213	214-315
Постоянная нагрузка	1	Минимальная		+														
	2	Максимальная	+															
Ветровые нагрузки	4	120				+	+											
	...	...			+													
	75	284			+	+												
Снеговые нагрузки	76-78	Предельные								+	+							
										+	+							
Температурные нагрузки	79-81	Экстремальные								+	+							
										+	+							
	82	Темпер. нагр. (+30)																
	83	Темпер. нагр. (+45)																
	84	Темпер. нагр. (-20)																
	85-86	Темпер. нагр. (-35)																
Технологические	87-120																	
	121-147																	
Крановые	148-213	3021-3069																
Крановые	214-315	3071-3129																

1,5 часа



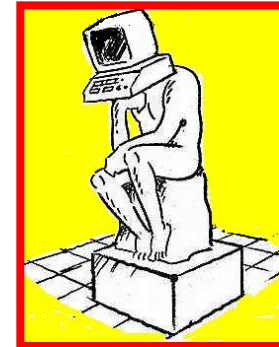


## ИТАК:

1. В несимметричных зданиях (и даже в симметричных при учете окружения) может появиться большое число вариантов ветрового нагружения.
2. Для подвижных нагрузок заведомо следует считаться с возможностью большого числа вариантов их позиционирования.
3. Имеется проблема независимой оценки роли каждого из однотипных нагружений. Возможно, что некоторые из мыслимых вариантов заведомо могут быть классифицированы как нерасчетные. Это задача для исследования.
4. Группу взаимосключающих нагружений нужно нумеровать подряд



Есть ли вопросы ?



## Тема 5: Расчеты на сейсмику по спектральной теории и по акселерограммам

Для сооружений высокого уровня ответственности нормы предусматривают выполнение прямого динамического расчета с использованием акселерограмм.

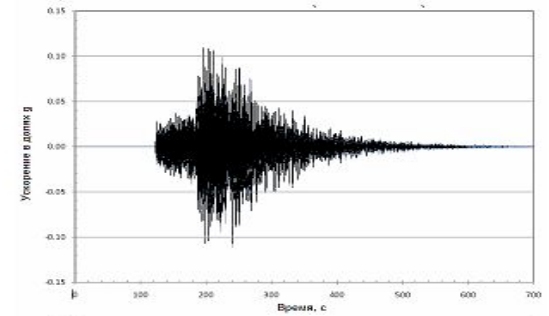
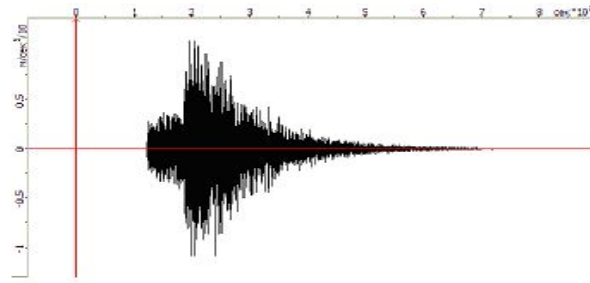
Одновременно необходим и расчет и по спектральному методу, а окончательно следует принимать более невыгодное решение.

Трехкомпонентные акселерограммы расчетных землетрясений были представлены Институтом геофизики им. Субботина НАН Украины. Их проверка выполнялась Редактором акселерограмм из SCAD Office. Понадобилась корректировка линии отсчета и частотная фильтрация.

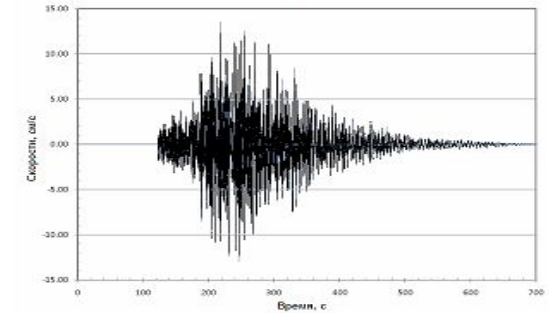
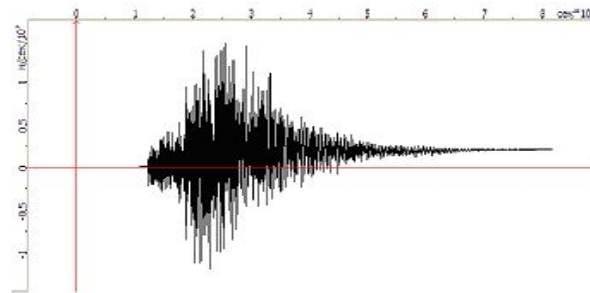
## Исходные

## Скорректированные

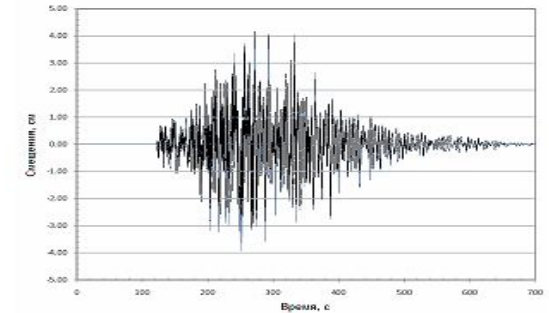
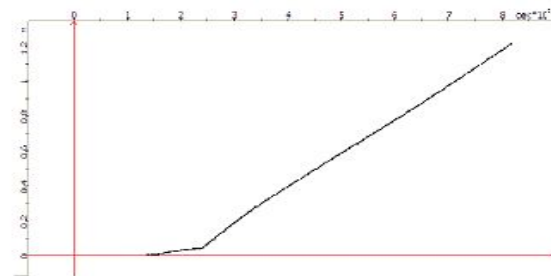
Ускорения



Скорости

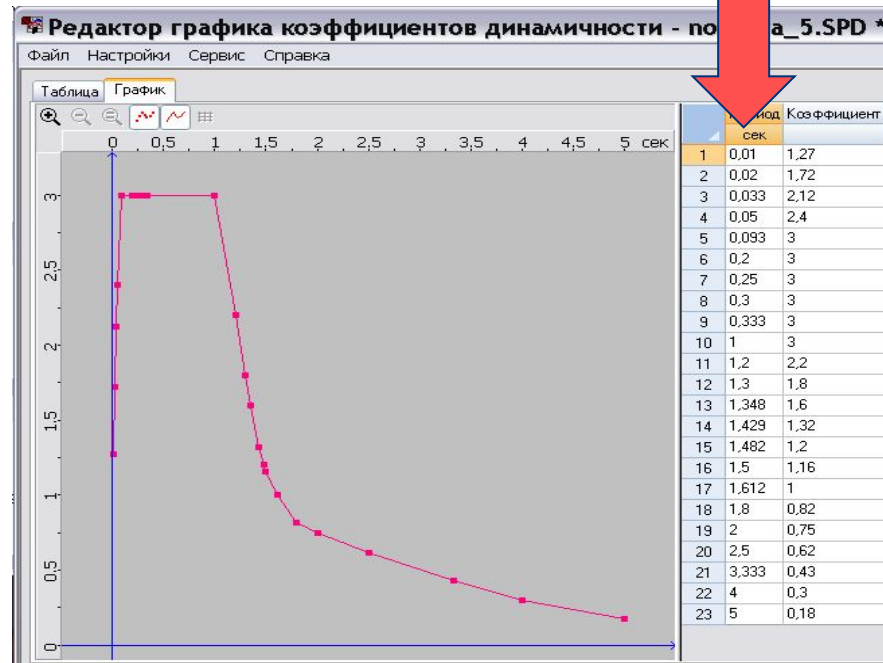
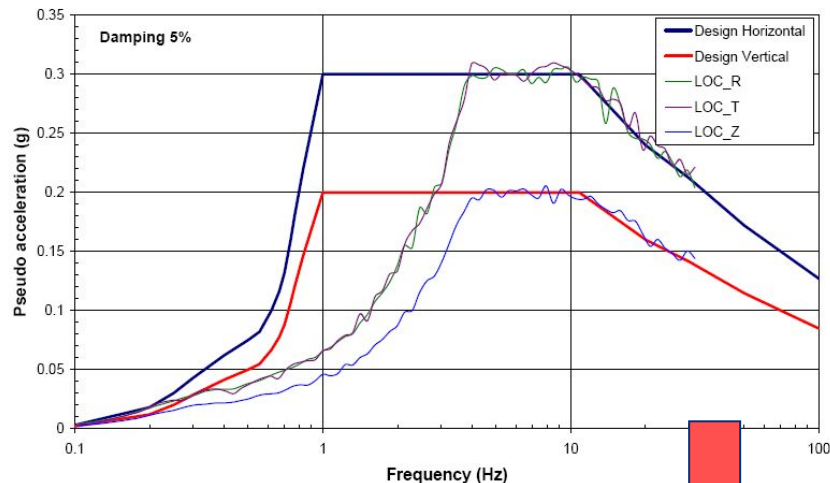


Смещения

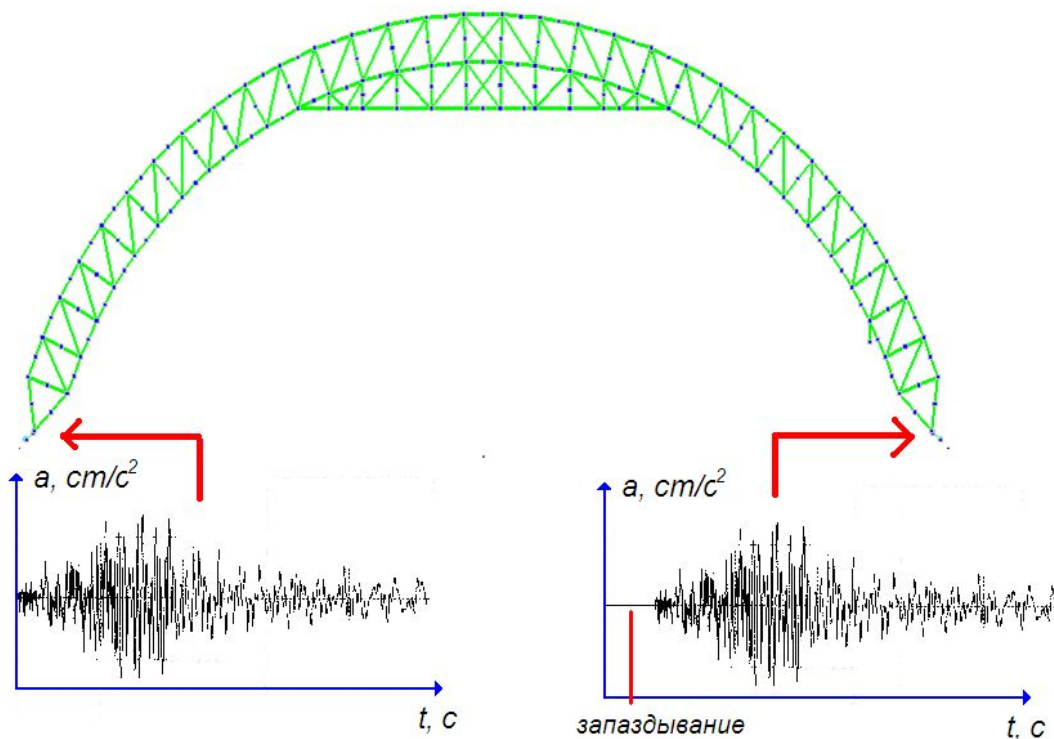


Расчет по спектральному методу выполнялся традиционным способом, за исключением того, что использовался специально разработанный Институтом геофизики для площадки Чернобыльской АЭС график спектрального коэффициента динамичности, который был введен в расчетную программу Редактором коэффициентов динамичности системы SCAD Office.

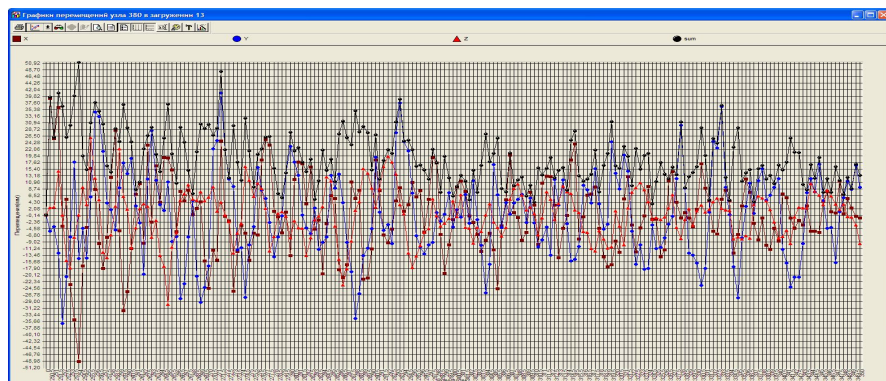
MDE RESPONSE SPECTRA  
LOC Earthquake



В расчете по акселерограммам учитывался эффект **неодновременного возбуждения колебаний по основным рядам опирания арок**. Использовалась гипотеза «замороженной акселерограммы», переносимой со скоростью распространения сейсмической волны. Для этого был разработан специальный режим в модуле «Интегрирование уравнений движения» вычислительного комплекса SCAD.

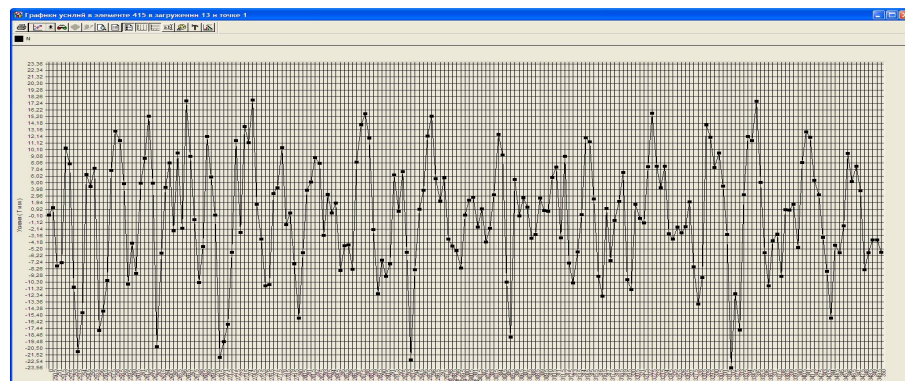


При прямом интегрировании уравнений движения мы получаем слишком большое число результатов, которое очень трудно проанализировать.

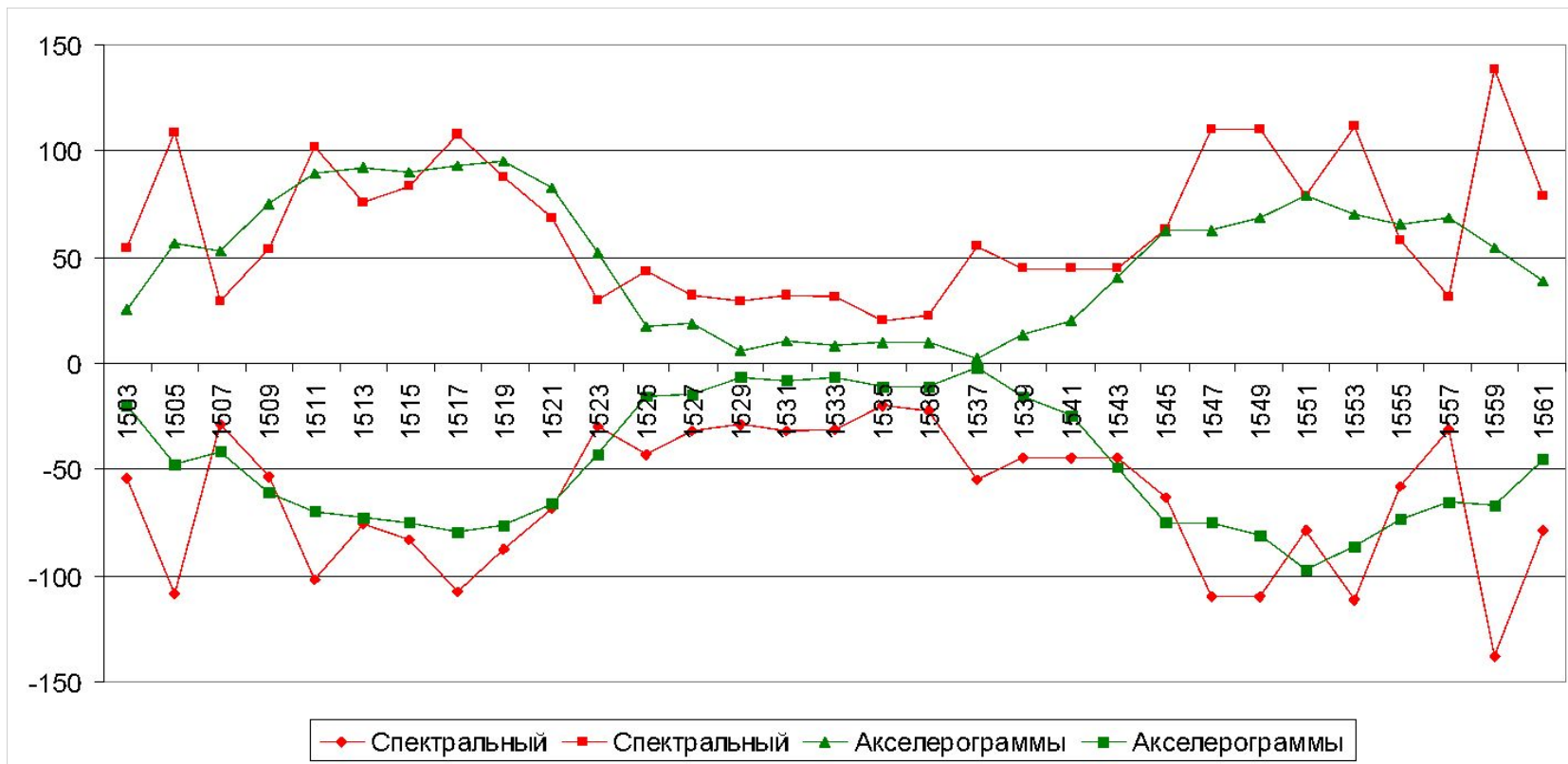


Узловые смещения:  $4 \times CU \times CT$ , где  $CU$  – число узлов,  $CT$  – число моментов времени.

Усилия в стержнях:  $6 \times CS \times CT$ , где  $CS$  – число стержней,  $CT$  – число моментов времени.



**Использование огибающих связано с «проблемой  
разновременности», которая не позволяет качественно  
сопоставить результаты и выполнять проверки при  
многокомпонентном напряженном состоянии**



**Огибающая продольных сил в нижнем поясе арки Н**



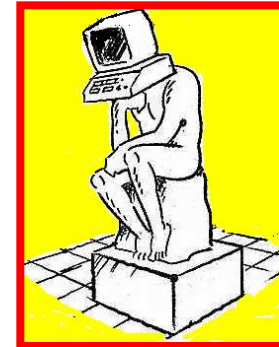


## ИТАК:

1. Проверка и корректировка акселерограмм должна стать обязательной частью расчета
2. Использование огибающих перемещений и усилий дает возможность хотя бы качественно оценить результаты расчета по акселерограммам.
3. Если использовать график коэффициента динамичности, построенный на основании акселерограммы, то следует ожидать неплохого совпадение результатов оасчета по спектральному методу и по акселерограмме.



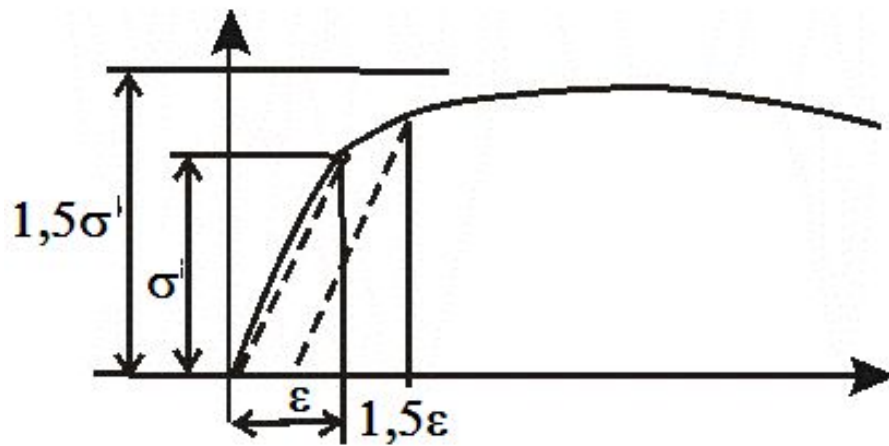
Есть ли вопросы ?



## Тема 6: Некоторые особенности расчета на температуру

Температурная нагрузка является не силовым, а кинематическим воздействием. А это определяет некоторые специфические особенности такого нагружения.

- во-первых вычисленный по напряжениям коэффициент запаса не является достаточной характеристикой надежности;
- во-вторых, здесь на результат сильно влияет точность задания расчетных условий.



## КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА

Увеличение напряжения в 1,5 раза приведет к разрыву стержня, а увеличение деформации в те же 1,5 раза — лишь к росту остаточных деформаций.

## ТОЧНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

Малые изменения силовой нагрузки приводят к малым изменениям перемещений, а неточно заданные кинематические условия могут дать большой разброс в значениях усилий.

По сути, здесь нет ничего нового, чем другое прочтение закона Гука: если в упругой системе большие силы приводят к малым деформациям, то ее малые деформации могут быть связаны с большими усилиями.

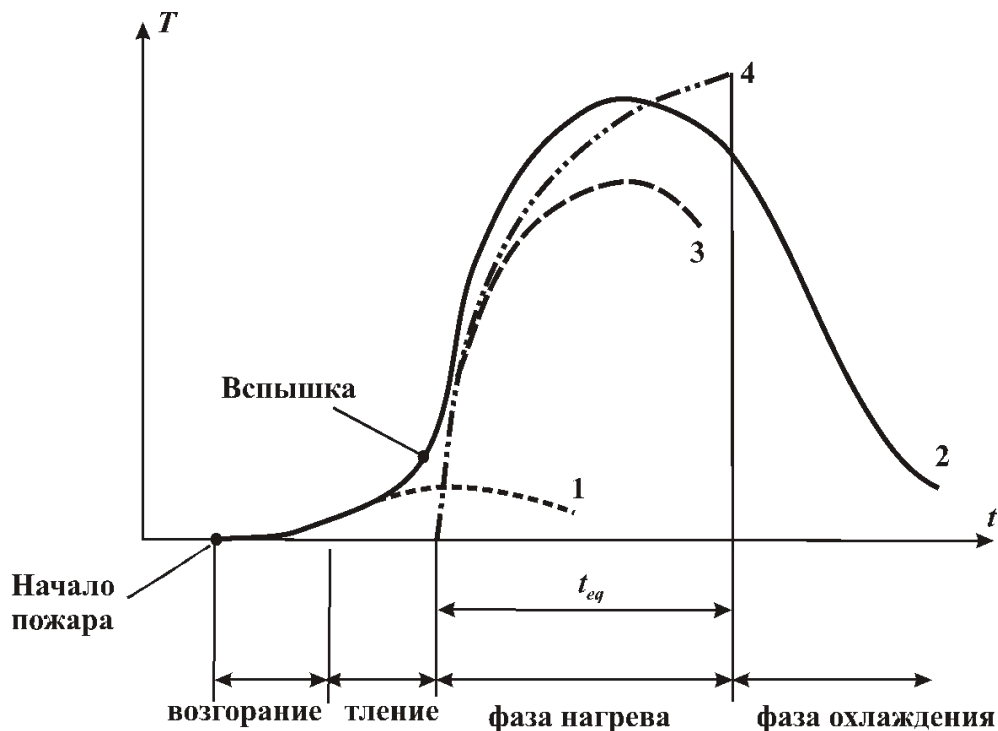
## ПАРАДОКС НОРМ

Нормы проектирования разрешают не учитывать климатические температурные воздействия, если размеры температурного отсека не превышают предельных. Но если выполнить расчет предельного температурного отсека, то оказываются что температурные усилия могут намного превышать несущую способность.

**Вместе с тем неизвестны неприятности от этого.**

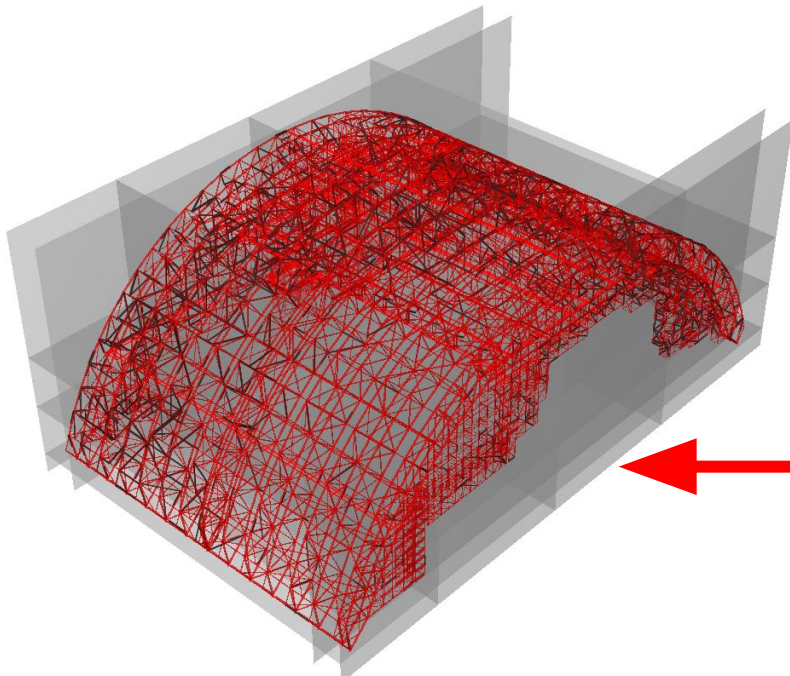
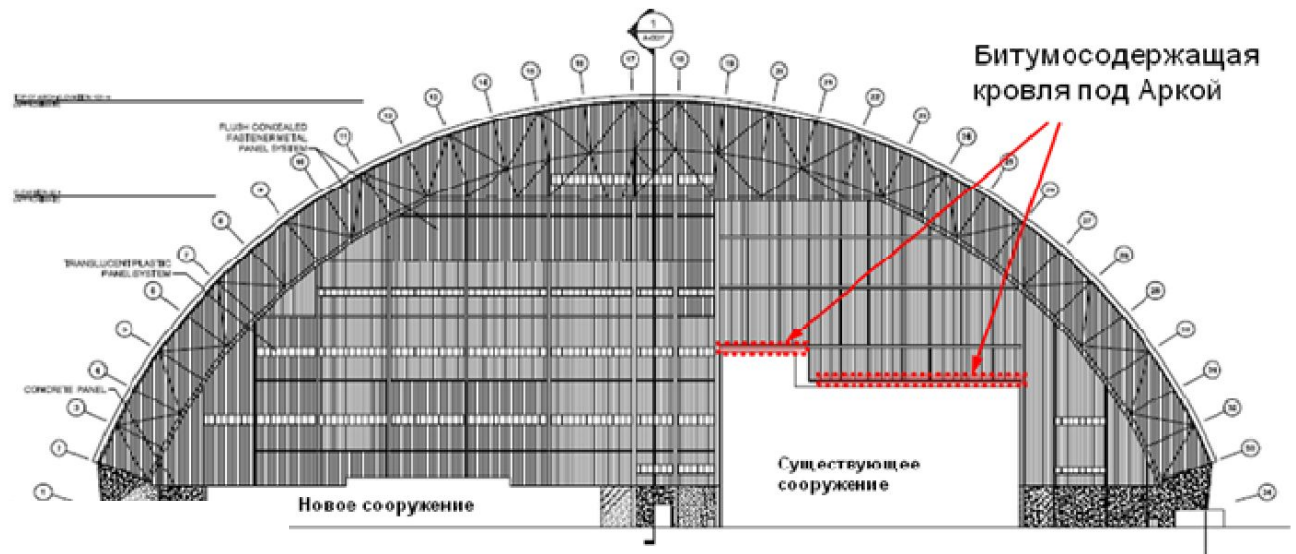
Здесь огромную роль играют те эффекты, которыми обычно пренебрегают в расчетах конструкций на силовые воздействия. Например, пренебрежение чернотой в болтовых соединениях, которые дают возможность сдвига без возникновения внутренних усилий. А эта чернота может иметь размеры, сопоставимые с величиной температурного удлинения, отсюда и неточность обычного температурного расчета.

# Температурное воздействие пожара



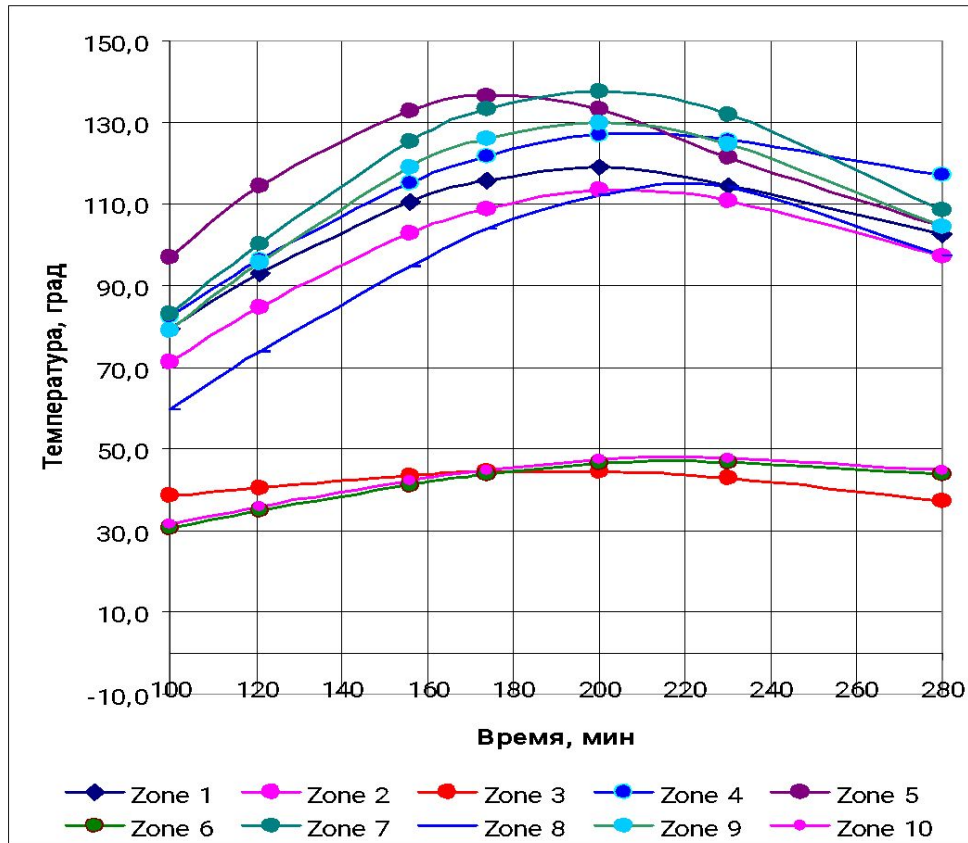
Кривая «температура–время»: 1 — при успешных действиях системы спринклеров или пожарной команды; 2 — при развитии пожара; 3 — при действии пожарной команды, прибывшей после того, как появилось открытое пламя; 4 — по рекомендациям стандарта ИСО

# «Реальный» пожар



Объект был разбит на зоны, в каждой из которых был определен ход изменения температуры нагрева конструкций при развитии пожара.

## Изменение температуры нагрева элементов с течением времени



**Расчет не на «стандартный», а на реальный пожар возможен и необходим в тех случаях, когда его можно промоделировать. Основная проблема – сопротивление регулирующих органов.**



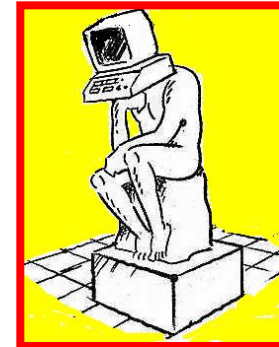
## ИТАК:

1. Расчет на температурные воздействия может потребовать применения другой (более детальной) расчетной схемы.
2. Перегрузка от температурного воздействия менее опасна, чем перегрузка от силового нагружения
3. Температура пожара, которой оперируют нормы соответствует непосредственному действию пламени на конструкцию. В некоторых случаях можно учитывать реальное расположение горючих материалов.



Есть ли вопросы ?





## Тема 7: О стратегии подбора сечений стальных конструкций

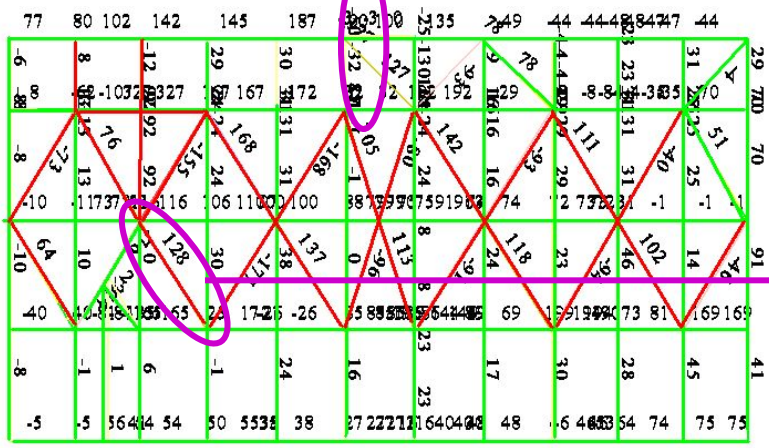
В программе СКАД реализован режим проверки сечений стальных конструкций и их подбора из заранее заданного сортамента.

Этот режим предусматривает, что если заданные сечения не удовлетворяют требованиям норм, то их увеличивают до следующей позиции сортамента и так продолжается, пока не произойдет согласование с нормативными требованиями.

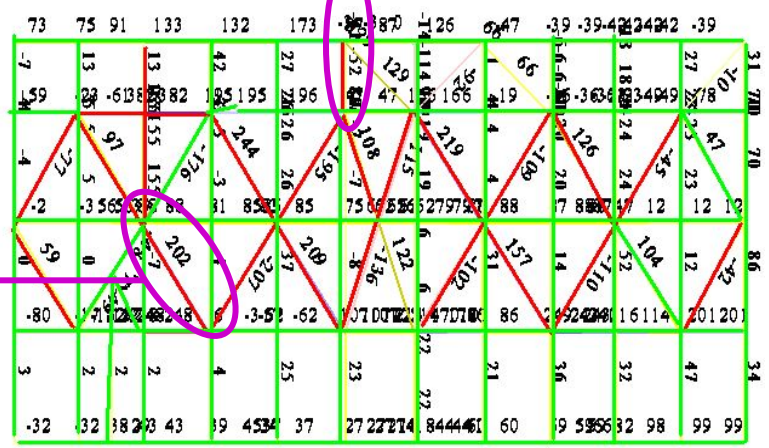
После подбора сечений выдается информация о степени изменения параметров жесткости.

Обычно в инженерной практике сечения меняются незначительно и перерасчет системы с новыми значениями жесткостей не выполняют. При расчетах конструкций нового безопасного конфайнмента обнаружилось, что количество требующихся итераций оказалось неожиданно большим.

**Результат перерасчета**

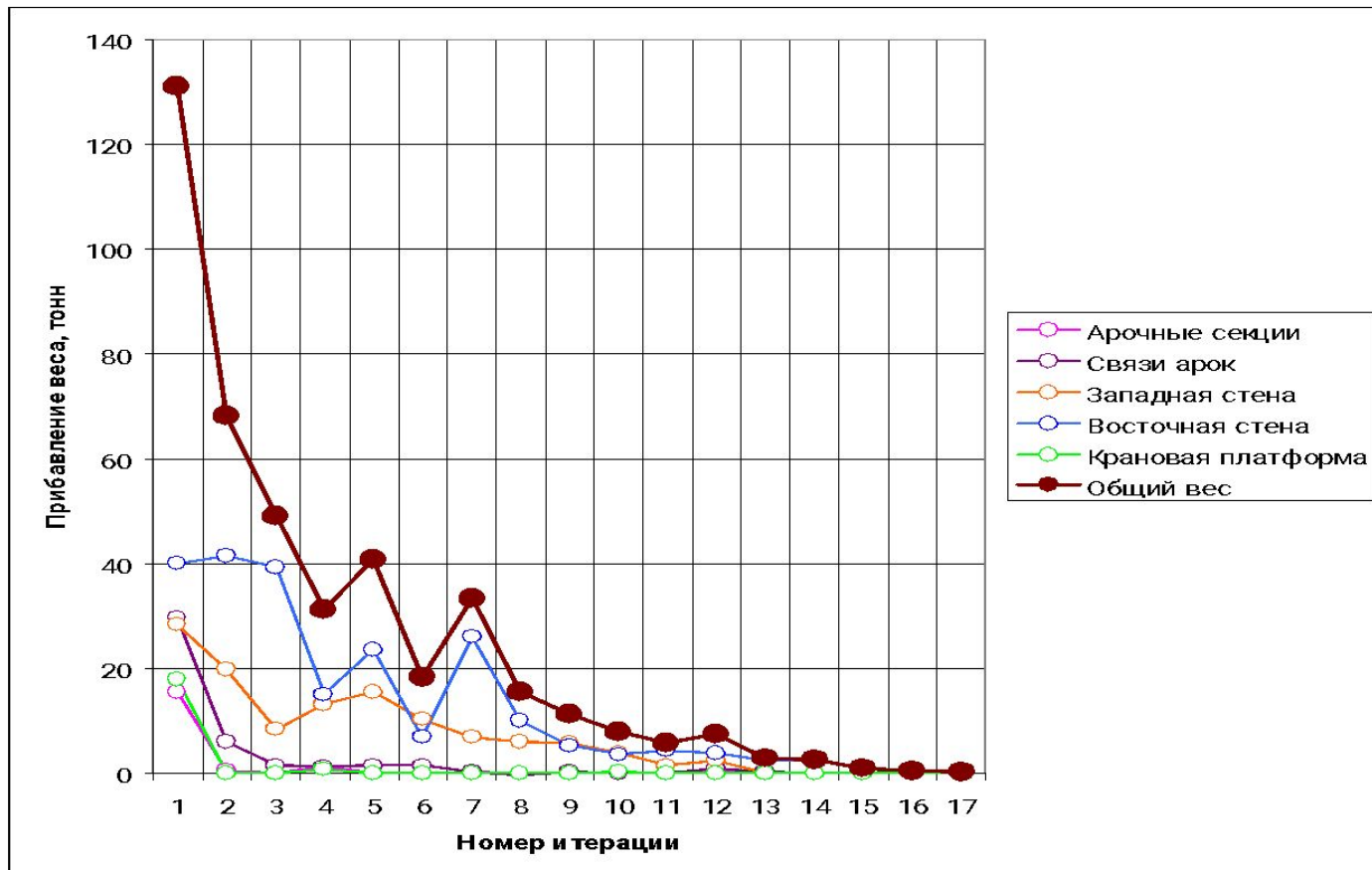


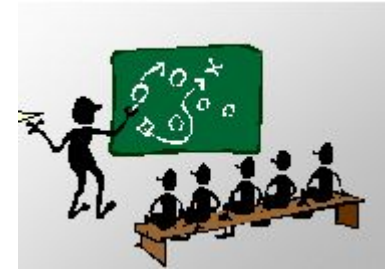
Исходные сечения



После увеличения

При расчете на действие смерча пришлось выполнить 18 итераций. Вот как менялось значение прибавки в весе конструкций от итерации к итерации:





## ИТАК:

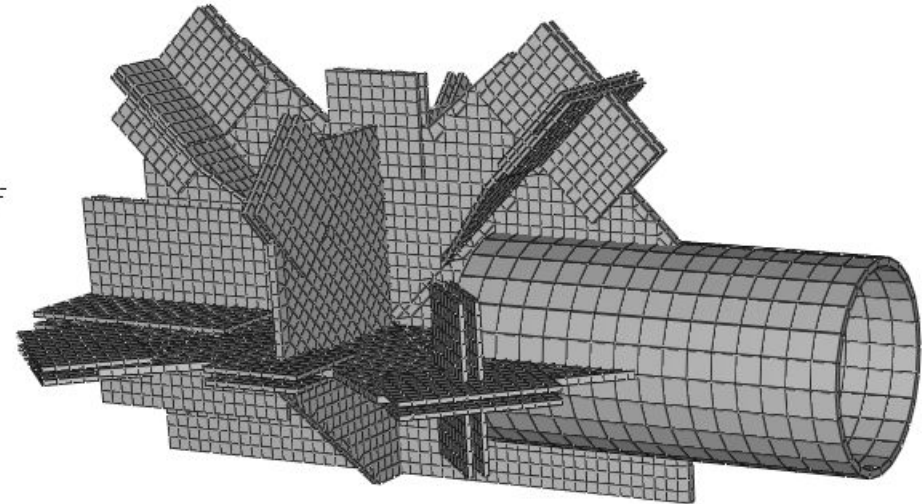
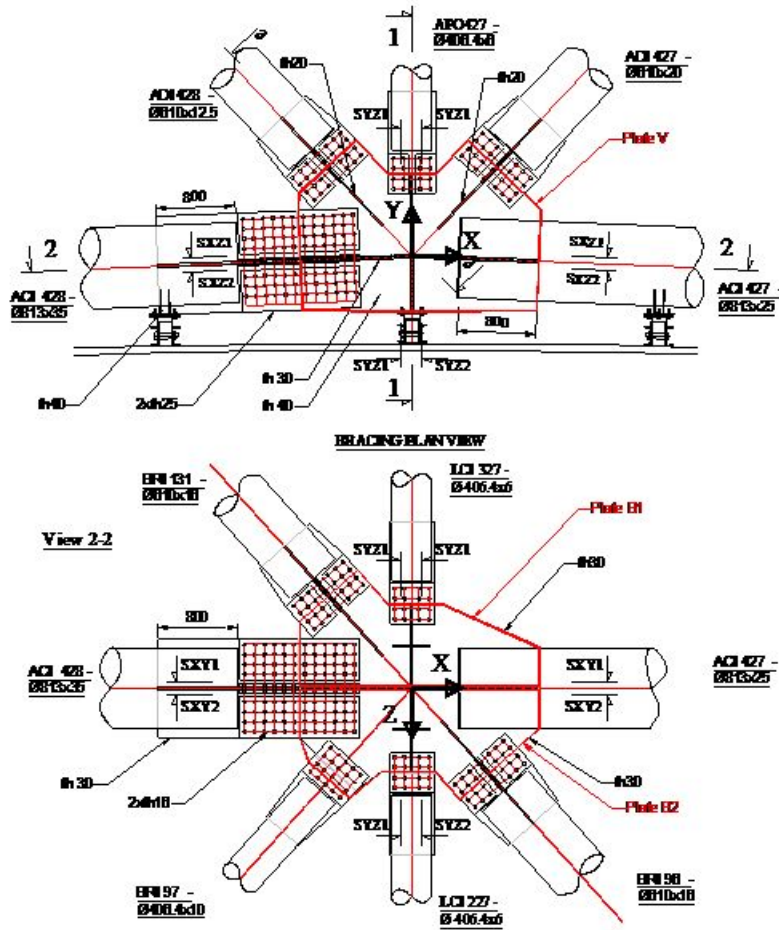
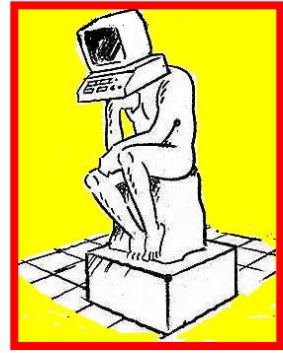
В инженерной практике широко распространено мнение, что при изменении жесткостей менее чем на 30% можно не делать перерасчет. Такой подход основан на анализе поведения простых статически неопределимых систем типа рам и отказывается неприемлемым при расчете систем, где :

- элементы подбираются не только по условиям прочности, но и по устойчивости;
- проверки выполняются на много вариантов нагружения.



Есть ли вопросы ?

# Тема 8: Работа болтов в МНОГОБОЛТОВОМ СТЫКЕ



**Structure CAD (ТИПОВОЙ\_УЗЕЛ\_НБК)** (G:\НБК\_ЧАЭС\УЗЕЛ\Узел\_НБК\_Сборка-Копия)

Проект Файл Опции Операции Сервис Справка

Эпюры напряжений вдоль прямой

Эпюры усилий Поля напряжений Постпроцессоры Группы

## Эпюры напряжений

Изополя напряжений

Выкл. NX (Т/м2)

█	-49211,06	-45020,33
█	-45020,33	-40829,6
█	-40829,6	-36638,87
█	-36638,87	-32448,14
█	-32448,14	-28257,41
█	-28257,41	-24066,68

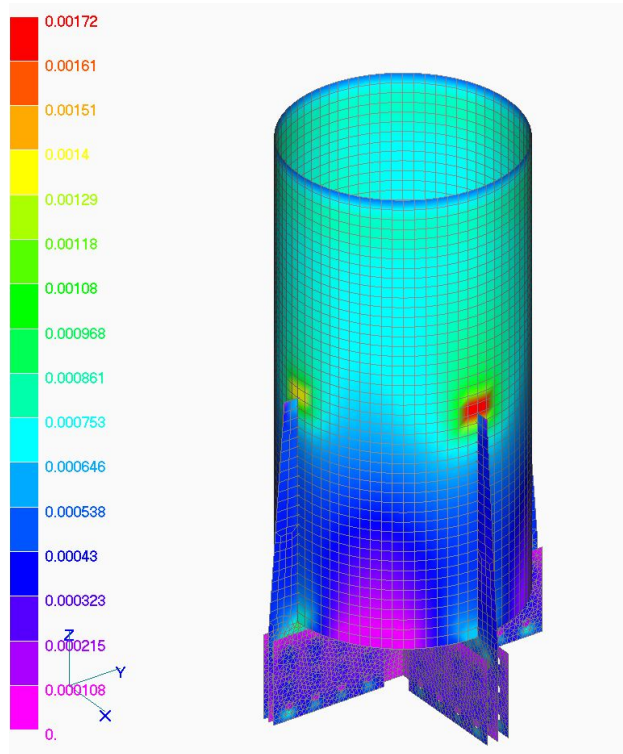
35  
22  
49  
5  
3

ИТЬ  
КРЫТЬ

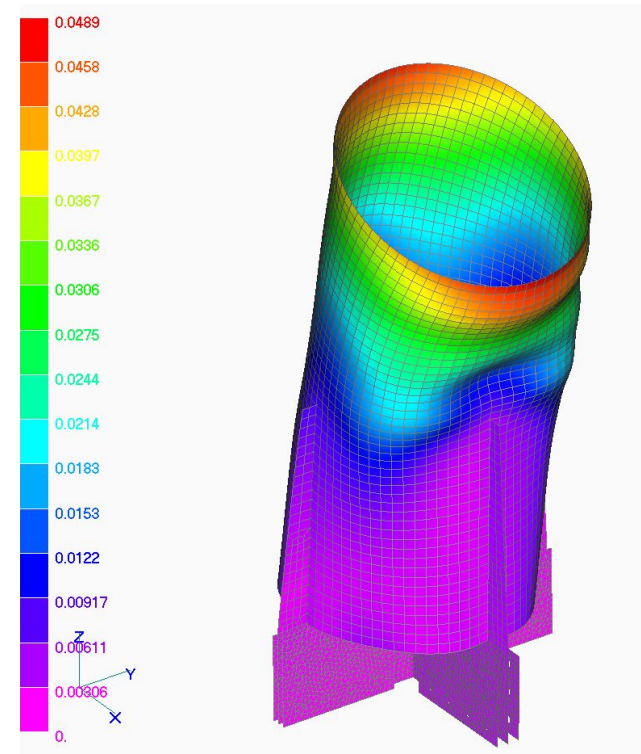
10:47

Главное напряжение

## Особенности работы за пределом упругости

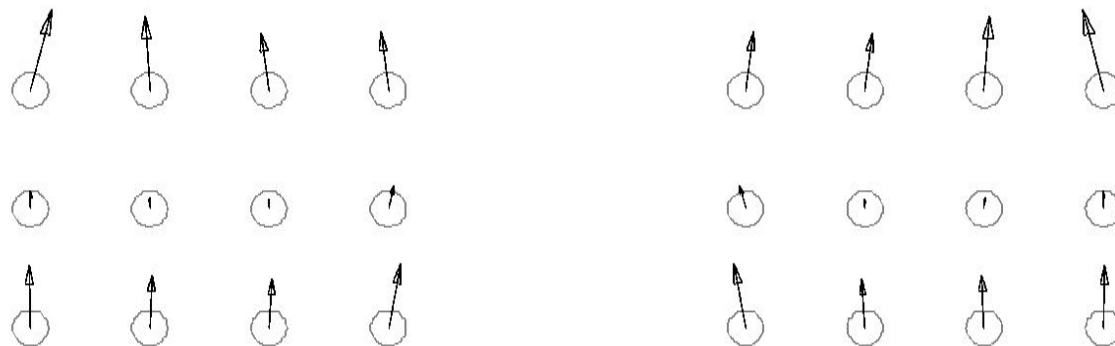


Сжатие



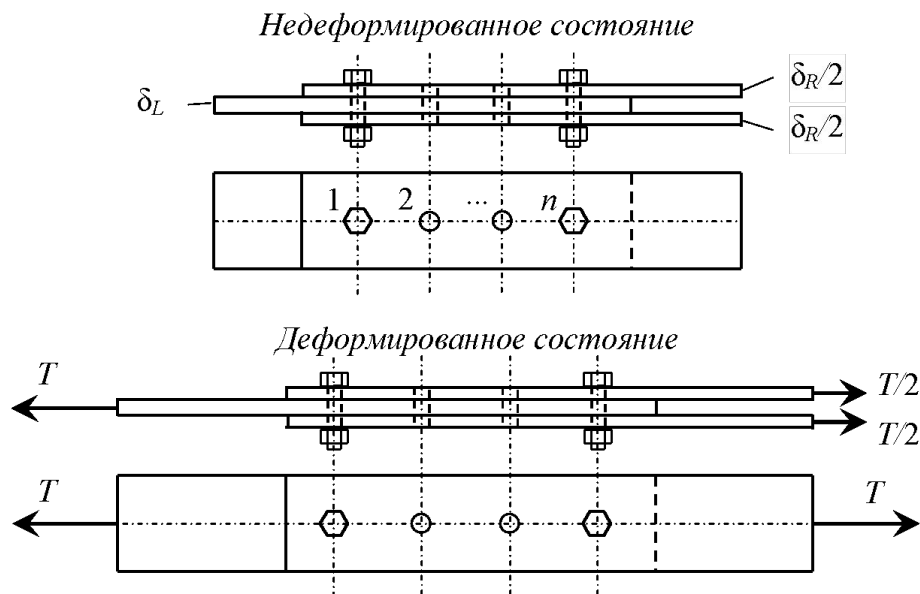
Изгиб

Подсчитаны перерезывающие силы, передающиеся на болты. Показано, что при действии продольной силы  $N$  на фрагмент с ребрами, имеющими три ряда болтов, при выбранной расчетной модели силы в средних рядах болтов практически равны нулю.



Механизм явления объяснил В.Н. Гордеев на простом модельном примере.

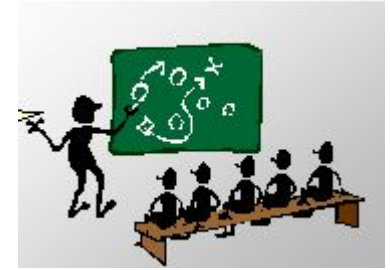




Рассматривается заготовку для соединения с отверстиями для болтов. Пусть поставлены только болты крайних рядов, а другие отверстия свободны.

Под действием  $T$  полосы будут удлиняться, но до тех пор, пока под крайними болтами не будет проскальзывания, все три полосы на участке между крайними рядами будут растягиваться равномерно, и свободные отверстия во всех полосах будут оставаться друг против друга.

Из этого следует вывод о том, что в многорядном болтовом соединении, до тех пор, пока нет проскальзывания, все усилие, приложенное к соединению, передается только болтами крайних рядов. Болты промежуточных рядов в работе не участвуют.



## ИТАК:

1. Для фрикционного соединения обычно используемая гипотеза о выравнивании усилий в болтах реализуется только при условии допущения сдвигов соединяемых поверхностей. Если сдвиги недопустимы, то не следует использовать гипотезу о выравнивании усилий.
2. При переменной нагрузке необходимо искать предел приспособляемости.



Есть ли вопросы ?

**Благодарю вас за внимание  
ДОКЛАД ОКОНЧЕН,  
НО ПРОБЛЕМЫ ОСТАЮТСЯ**

