



# ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

13 – 14 июня 2024 года Казахстан

## ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПРИМЕРЕ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ТЭЦ

**АНУЩЕНКО АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ**

Ведущий инженер

ООО «ЦВС», г. Санкт-Петербург, Россия



CKTI-VIBROSEISM

A STRUCTURAL-MECHANICAL CONSULTING ENGINEERING FIRM



SATBAYEV  
UNIVERSITY



# КОМПЛЕКСНЫЙ ХАРАКТЕР СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ



паровые котлы



СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЭЦ



турбины



котлы-утилизаторы



трубопроводы



ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

# КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ «КАРКАС-КОТЕЛ»

Объекты, с которыми работали специалисты ООО «ЦВС»

Объект, страна	ZPGA, г	Высота, м	Масса, т	
			Котел	Каркас
FPP «BAR», India	0.24	103.8	17000	7200
FPP «LONG PHU», Vietnam	0.06	83.58	10809	4790
FPP «SOFIA», Bulgaria	0.23	22.46	787	198.3
ТЭЦ «СОВЕТСКАЯ ГАВАНЬ», РФ	0.20	35.55	1358	470
НЕВИННОМЫССКАЯ ГРЭС, РФ	0.10	28.3	1012	272.2
НЕРЮНГРИНСКАЯ ТЭЦ, РФ	0.20	65	5872.2	4050.6
ИРКУТСКАЯ ТЭЦ, РФ	0.19	35.7	3272.7	1341.5



Элементы подвесной системы

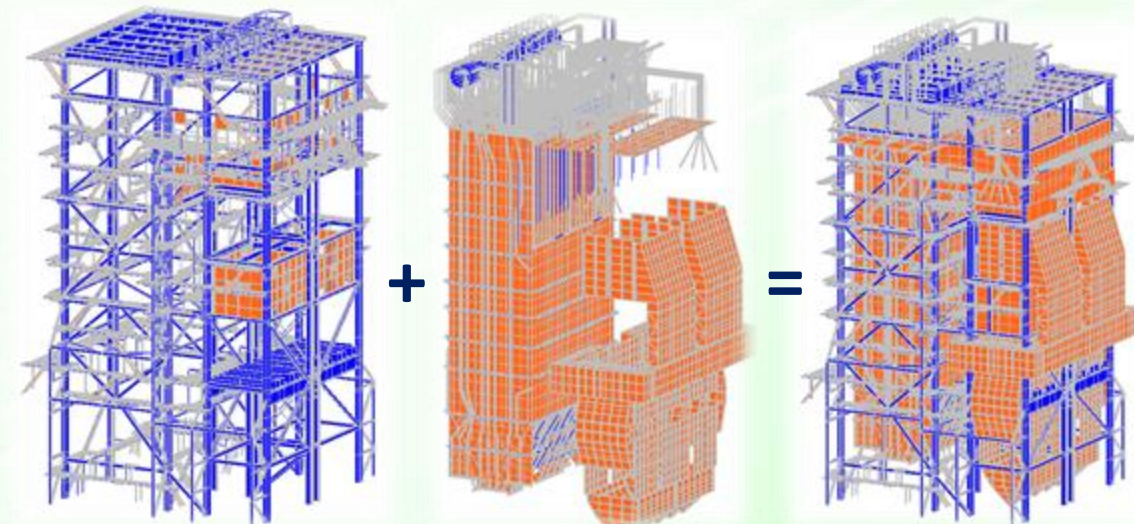
без подвешенной массы



с подвешенной массой



Сравнение динамических реакций



КАРКАС

КОТЕЛ

СИСТЕМА

Общий вид



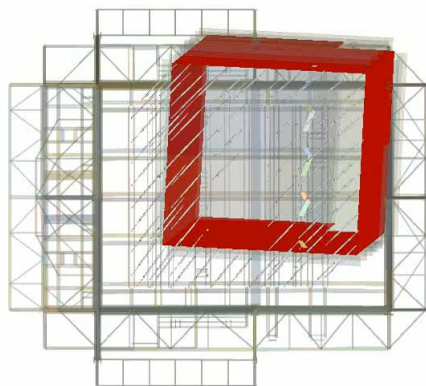
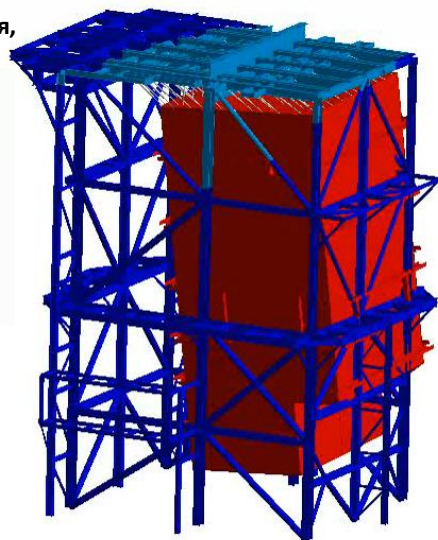
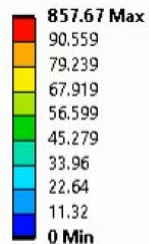
ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
 «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

# ВЕРОЯТНЫЕ СЦЕНАРИИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Свободно подвешенный котел

Перемещения,

мм



**АВАРИЯ вследствие**

- ✓ обрыва подвесок
- ✓ удара котла о каркас
- ✓ обрушения перекрытия

**! НЕ ДОПУСКАЕТСЯ !**



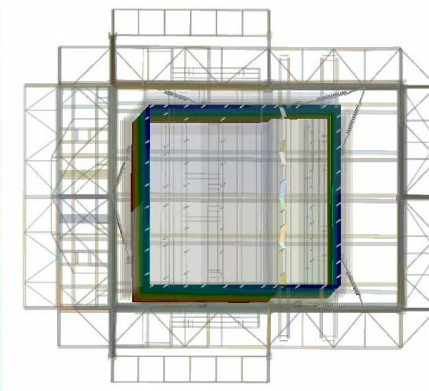
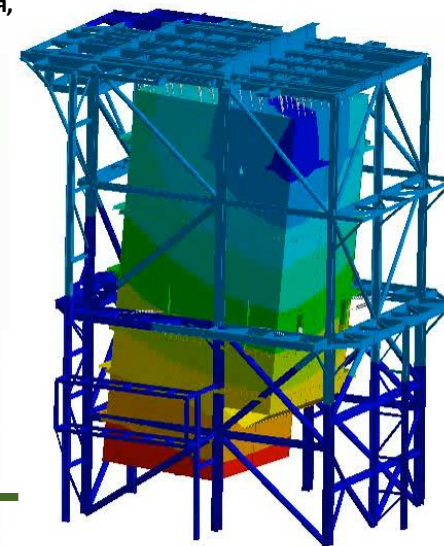
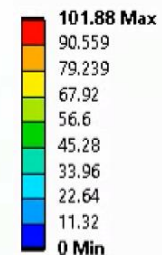
Применение средств регулирования динамических реакций



Котел с раскреплением

Перемещения,

мм



**! ПРОДОЛЖЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ !**



ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

# ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТОВ

**ГЛАВНАЯ ПРОБЛЕМА:** отсутствие взаимосвязи и наличие противоречий между нормами строительного проектирования и руководящими документами по проектированию котлов.

- ✓ Пункт 5.1 СП 14.13330.2018 предполагает **игнорирование горизонтальных нагрузок от масс на гибких подвесках** и динамические воздействия от оборудования.
- ✓ Значение **относительного демпфирования** в долях от критического для металлических конструкций в соответствии со строительными нормами – **1%**; по ГОСТ 33963-2016 принимается на уровне 5% при проверке сейсмостойкости оборудования, согласно исследованиям – до **12...15%**.
- ✓ **Отсутствие** в строительных нормах допускаемых **параметров перемещений и деформаций** каркаса, исходя из технологических, а не эстетико-психологических требований.

Учитываются совместно

Конструктивные требования  
Технологические требования безопасности

## РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕТ ШИРОКИЙ СПЕКТР РАСЧЕТОВ ПО РАЗНЫМ НОРМАМ

- ✓ **прочность и общая устойчивость металлокаркаса котла** в соответствии с СП 16.13330
- ✓ соответствие **деформаций/перемещений элементов каркаса** величинам, указанным в РТМ 108.031.09-83
- ✓ соответствие **горизонтальных перемещений котла** значениям, не допускающим его о несущие конструкции каркаса при сейсмических колебаниях
- ✓ соответствие **продольных усилий в балках жесткости котла в местах сопряжения с каркасом** допускаемым величинам в соответствии с СП 16.13330 или проектом
- ✓ обеспечение **прочности и устойчивости подвесной системы котла** в соответствии с РД 10-249-98

ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

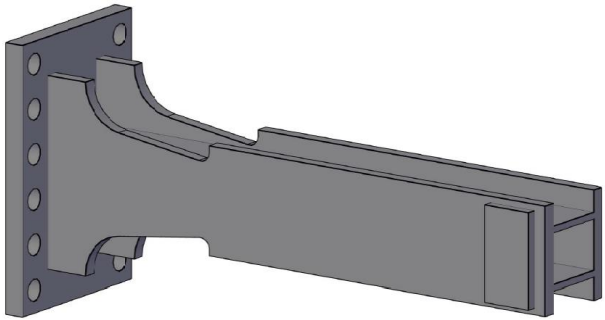
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»



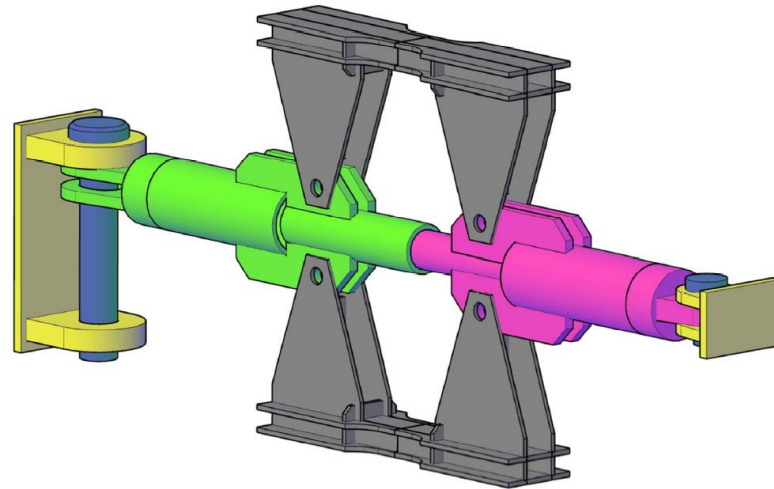
# СРЕДСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ КАРКАСОВ КОТЛОВ

использование пластических свойств деформирования металла  
**УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (УПЭ)**

- ✓ ограничение перемещений котла



консольные УПЭ



осевые УПЭ

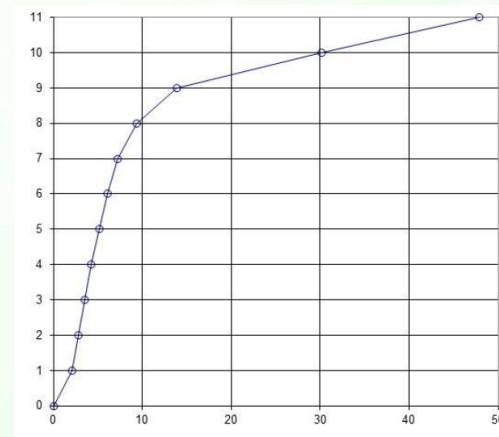
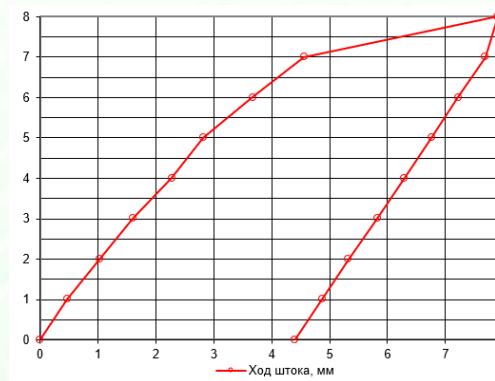
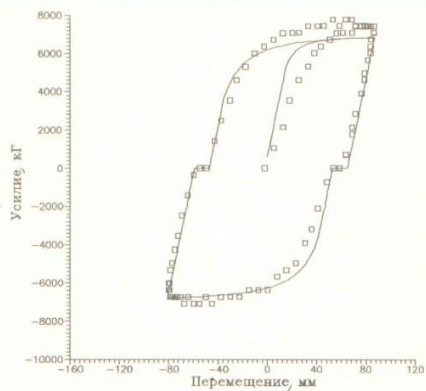
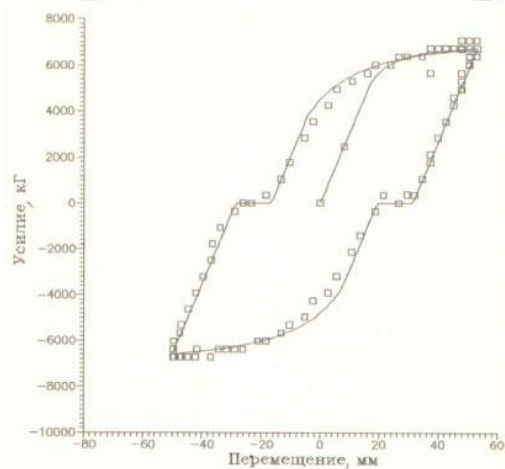
введение дополнительного демпфирования  
**ВЯЗКИЕ ДЕМПФЕРЫ (ВД)**

- ✓ ограничение перемещений котла
- ✓ регулирование работы подвесной системы



# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАСКРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

квазидинамические нагрузки аналогично низкочастотным (0.1...0.5 Гц) колебаниям котлов



НПО ЦКТИ, г. Санкт-Петербург

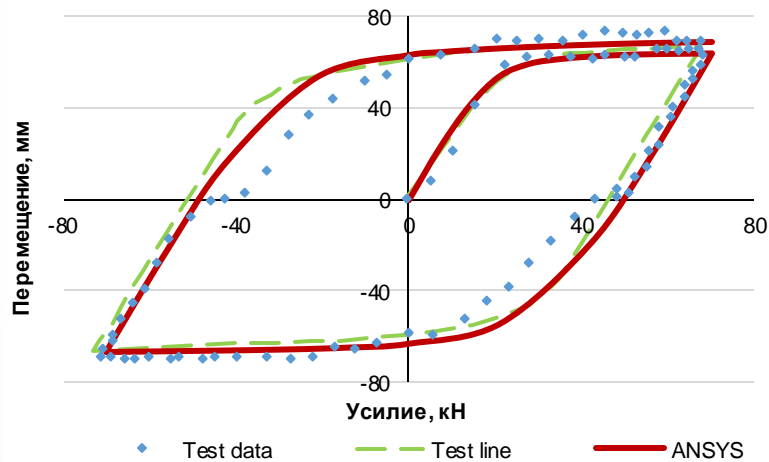
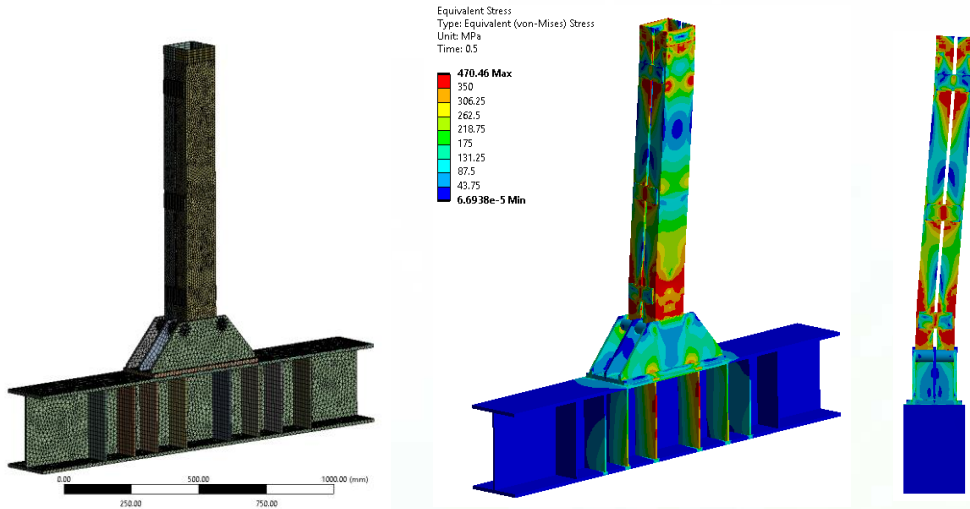
НИЦ Строительство, г. Москва



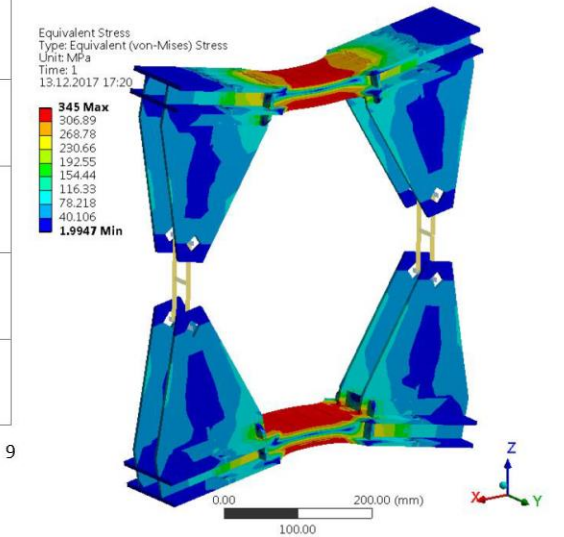
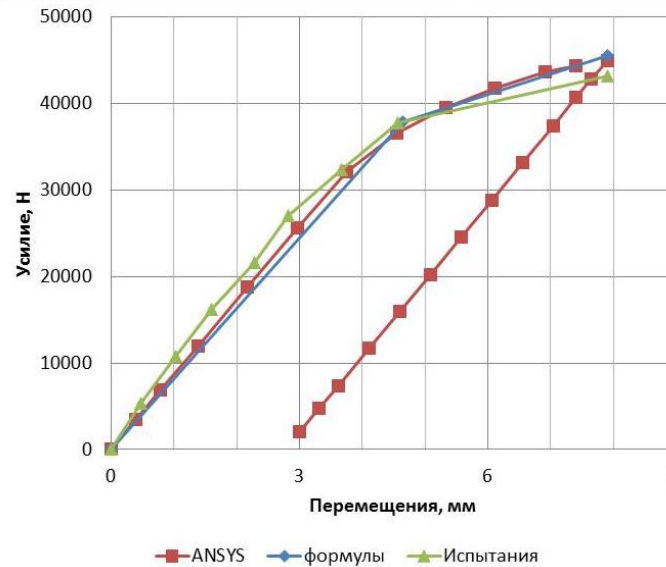
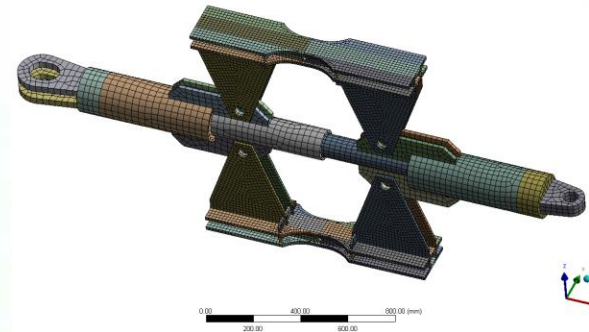
ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАСКРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

моделирование в программном комплексе ANSYS



Исследования Анущенко А.М.



Исследования доктора-инженера Кульцепа А.В.

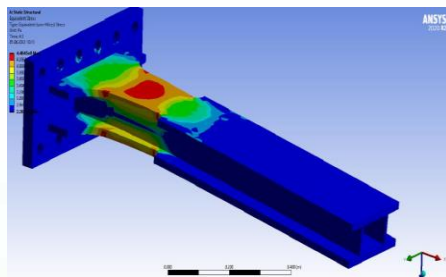
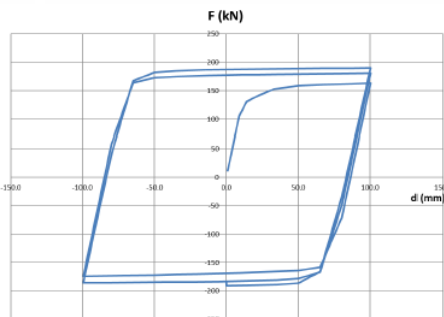
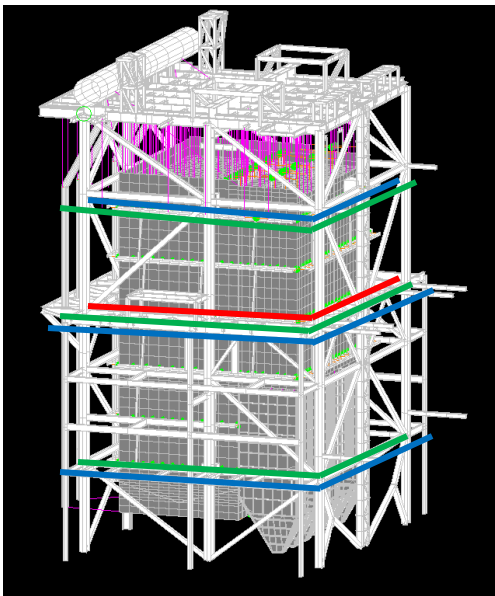


ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

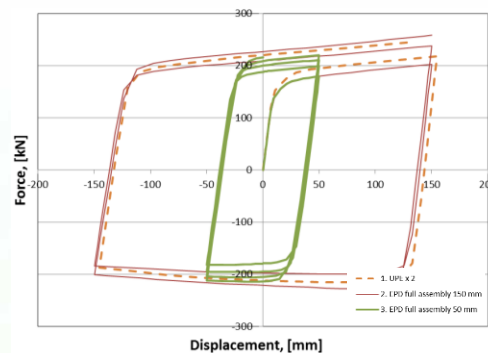


# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАСКРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

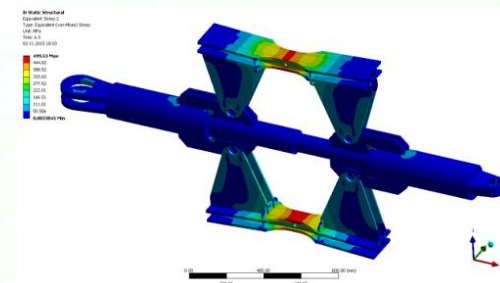
Определение рабочих характеристик УПЭ численными методами



Консольный УПЭ

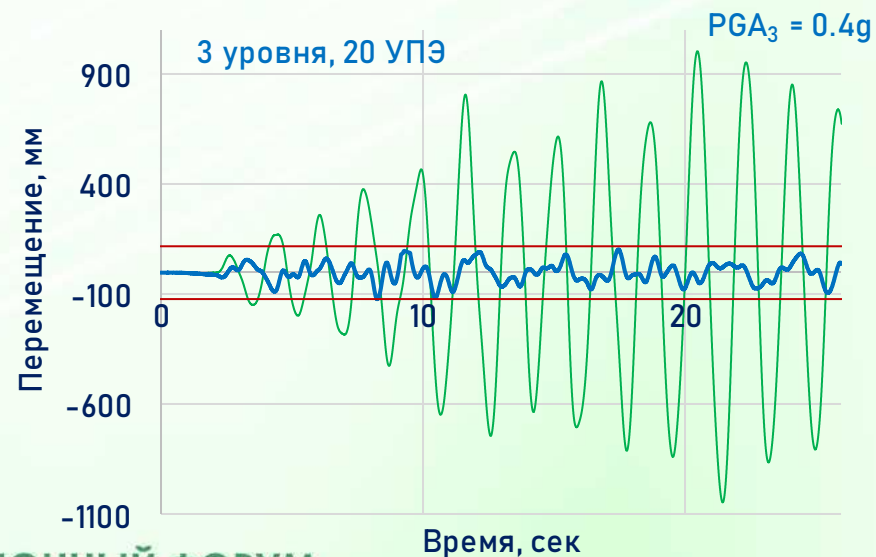


Осевой УПЭ



Обеспечение допустимых параметров перемещения котла при разной интенсивности землетрясения

Варианты уровней раскрепления



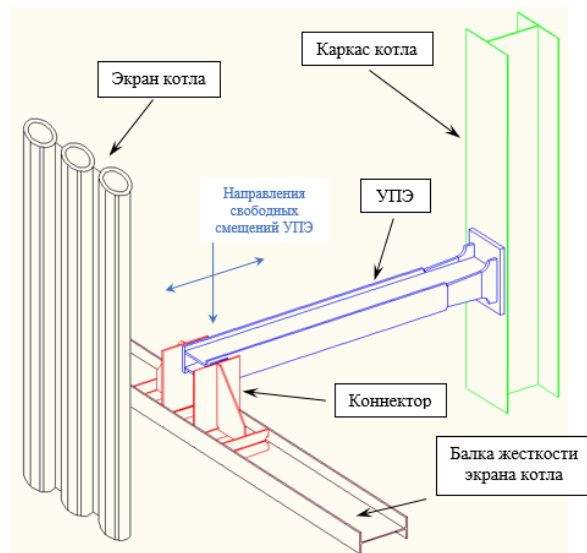
— без УПЭ — с УПЭ — допуск



ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАСКРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – СХЕМЫ УСТАНОВКИ



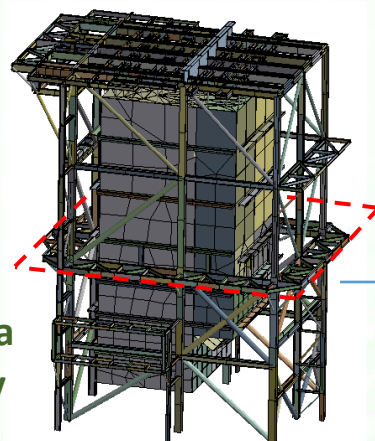
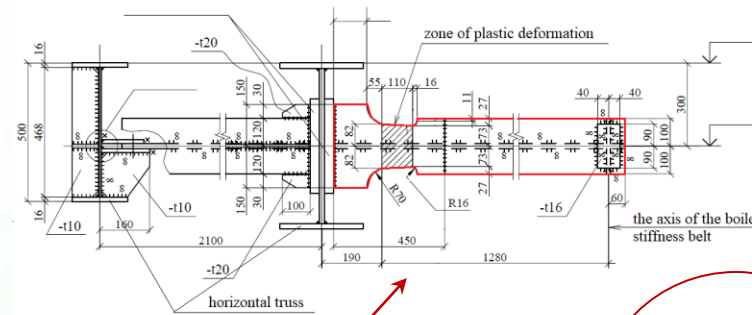
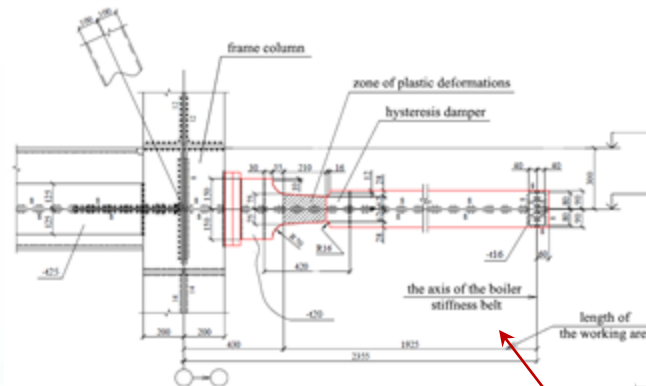
Принципиальная схема установки консольного УПЭ

## ДОСТОИНСТВА:

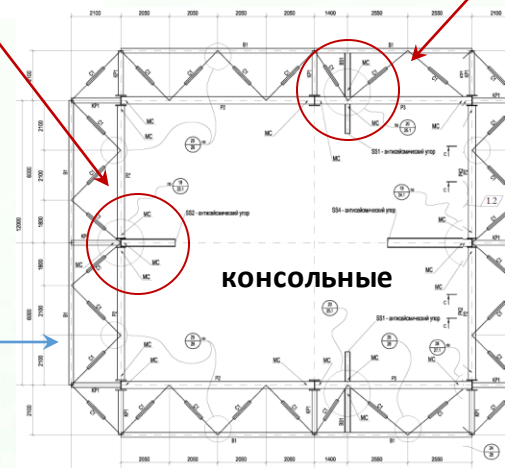
- ✓ легко встраиваются в систему
- ✓ сравнительно простое исполнение и дешевизна
- ✓ до 40 циклов работы на проектную амплитуду

## НЕДОСТАТКИ:

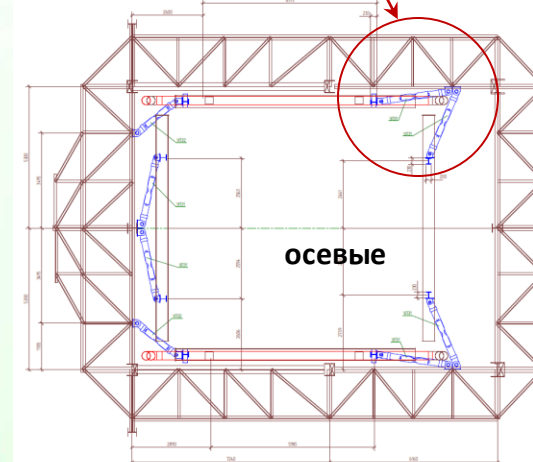
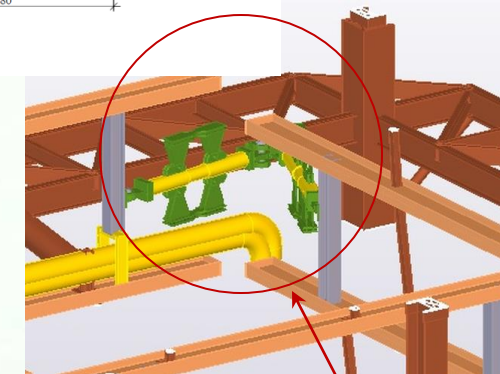
- ✓ требуют замены после пластического деформирования



Уровень монтажа УПЭ



Варианты расположения УПЭ



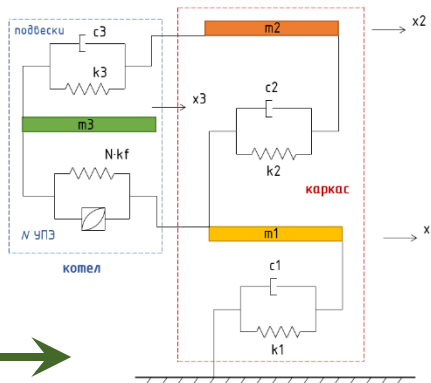
# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАСКРЕПЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА

Аналитические зависимости для определения геометрических и рабочих параметров УПЭ

$X_u := 200 \text{ mm}$     $R_p := 235 \text{ MPa}$     $E := 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$     $k_u := 0.98$   
 Фронтовой УПЭ-1  
 $s_x := 36 \text{ mm}$     $t := 20 \text{ mm}$     $h := 440 \text{ mm}$     $b_1 := 300 \text{ mm}$   
 $k := 160 \text{ mm}$     $L_{\text{кк}} := 3550 \text{ mm}$     $L_2 := 525 \text{ mm}$     $h_1 := h - 2s$   
 $L_{\text{уп}} := L - k$     $L_{\text{уп}} = 3.39 \times 10^3 \text{ mm}$     $L_1 := L_{\text{уп}} - L_2$     $L_1 = 2.865 \text{ m}$   
 $I_{\text{кк}} := \frac{t \cdot h^3}{6} + \frac{b_1 \cdot s^3}{6} + \frac{b_1 \cdot s}{2} \cdot (h - s)^2$     $I_1 = 1.05 \times 10^9 \text{ mm}^4$   
 $E_p := (1 - k_u) \cdot E$   
 $C_{\text{уп}} := \frac{3 \cdot E \cdot I_1}{L_{\text{уп}}^3}$     $C_{\text{уп}} = 1.617 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$   
 $Y_t := \frac{2 \cdot R_p \cdot L_{\text{уп}}^2}{3 \cdot E \cdot h}$     $Y_t = 20.459 \text{ mm}$   
 $F_y := C_{\text{уп}} \cdot Y_t \cdot k_u$     $F_y = 3.242 \times 10^5 \text{ N}$   
 $F_{\text{max}} := F_y + \frac{3 E_p \cdot I_1 \cdot X_u}{L_{\text{уп}}^3}$     $F_{\text{max}} = 3.889 \times 10^5 \text{ N}$   
 $b_2 := \left[ I_1 \cdot \left( 1 - \frac{L_2}{L_{\text{уп}}} \right) - \frac{t \cdot h^3}{6} \right] \cdot \frac{2}{\frac{s^3}{3} + s \cdot (h - s)^2}$     $b_2 = 244.806 \text{ mm}$   
 $\mu := \frac{X_u}{Y_t}$     $\mu = 9.775$   
 $W_s := \frac{F_{\text{max}} \cdot X_u}{2}$     $W_s = 3.889 \times 10^4 \text{ J}$     $K_{\text{eff}} := \frac{F_{\text{max}}}{X_u}$   
 $W_d := Y_t \cdot \left[ \frac{F_y}{2} + \frac{(F_{\text{max}} - F_y) \cdot (\mu - 1)}{2} - \frac{F_{\text{max}}^2}{2 \cdot F_y} + F_{\text{max}} \cdot (\mu - 1) \right]$     $K_{\text{eff}} = 1.944 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$   
 $\xi := \frac{W_d}{4 \cdot \pi \cdot W_s}$     $\xi = 0.152$     $\xi_1 := \frac{1}{2 \mu \pi} \cdot (\mu - 1)$     $\xi_1 = 0.143$

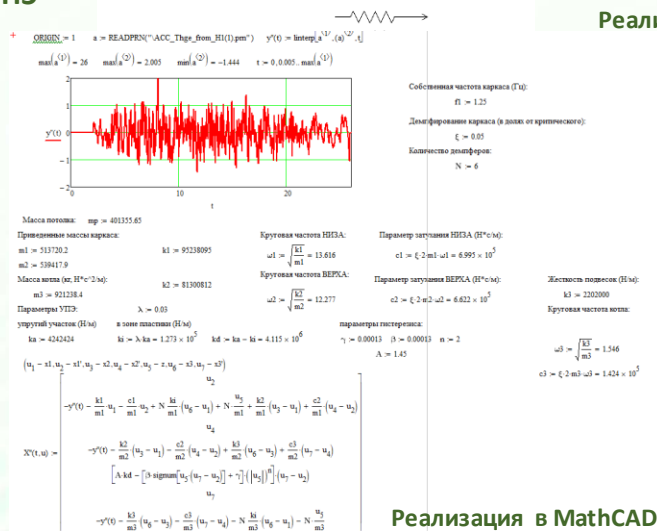
Реализация в MathCAD

Аналитическая нелинейная трехмассовая модель системы «каркас-котел»



ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА

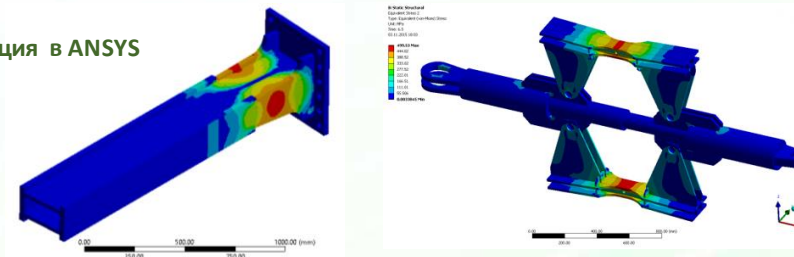
ЭФФЕКТИВНОСТИ УПЭ



Реализация в MathCAD

Численные расчеты УПЭ и системы «каркас-котел»

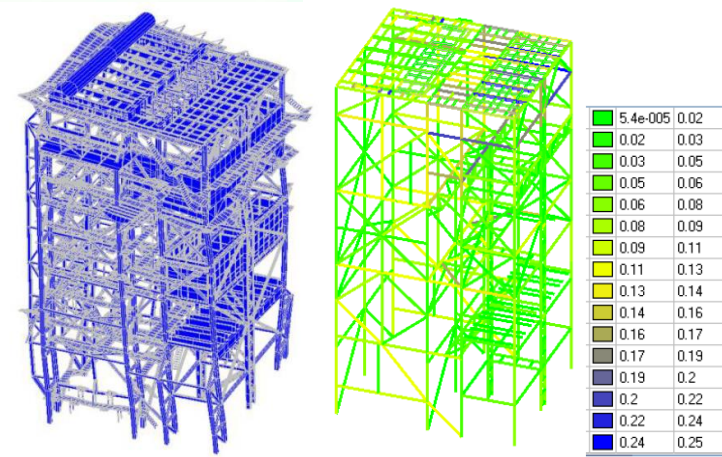
Реализация в ANSYS



УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ УПЭ

ОЦЕНКА НДС КАРКАСА

Реализация в SCAD Office



Исследования Анущенко А.М., Щукина А.Ю., к.т.н. Бондарева Д.Е.

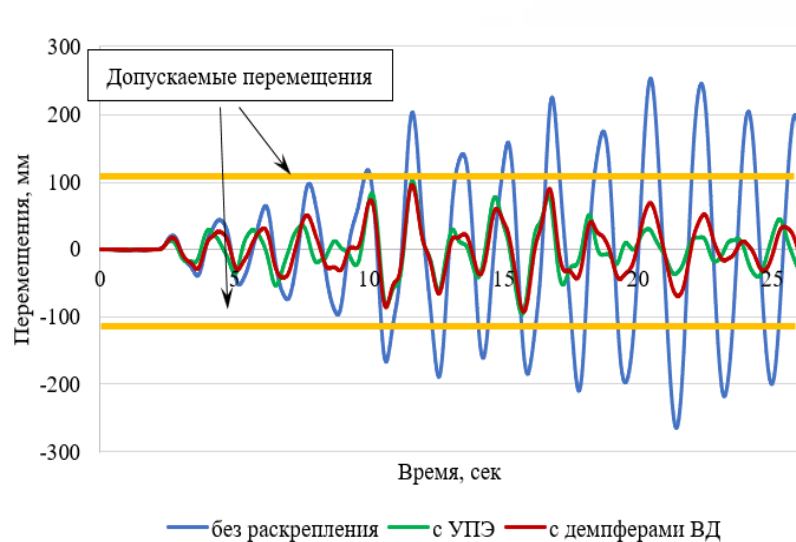
ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

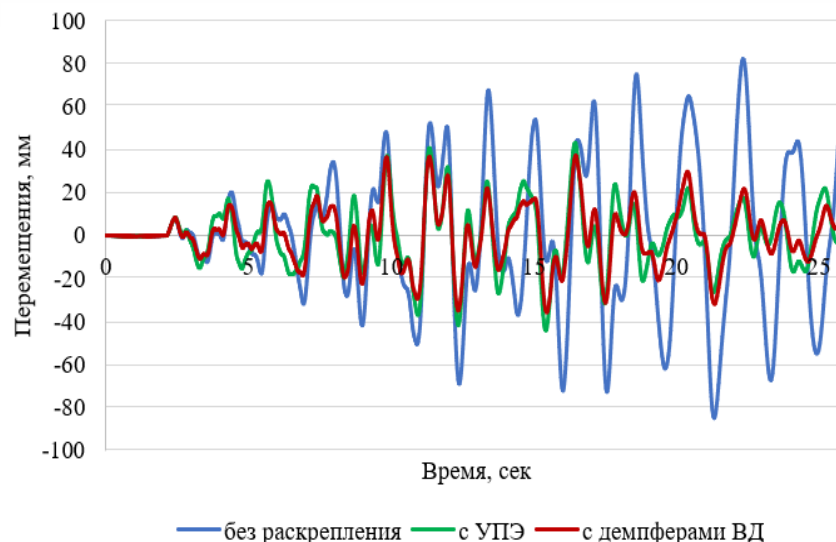


# ПРИМЕНЕНИЕ ВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ АНТИСЕЙСМИЧЕСКОГО РАСКРЕПЛЕНИЯ

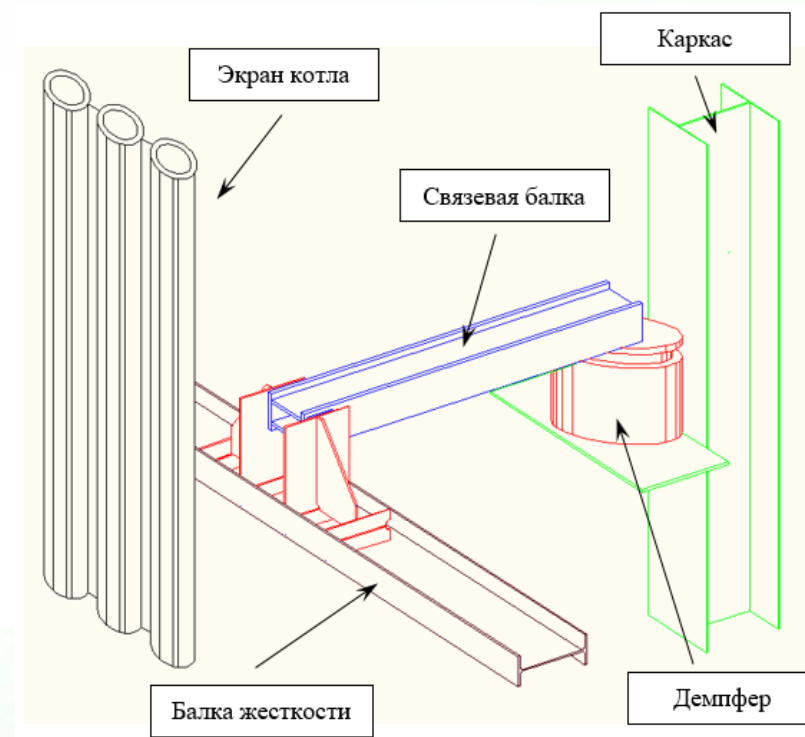
## Сравнение эффективности применения УПЭ и демпферов ВД



относительные перемещения котла и каркаса в уровне раскрепления



относительные перемещения верхнего каркаса



Принципиальная схема установки демпфера ВД

**Вязкие демпферы** работают не только в горизонтальном, но и **вертикальном направлении**.

**!** Жесткое сопряжение связевой балки и балки жесткости **позволяет регулировать вертикальные колебания котла**, что позволяет **уменьшить напряжения** от действия поперечных сил и изгибающих моментов **в перекрытии и колоннах каркаса !**



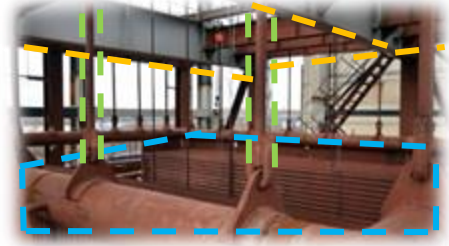
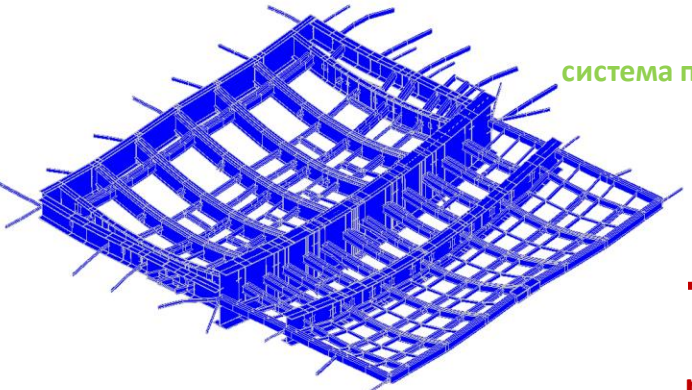
# ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЯ В ПОДВЕСНОЙ СИСТЕМЕ

гибкость перекрытия

перекрытие

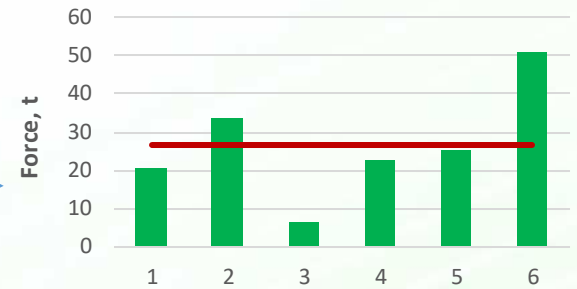
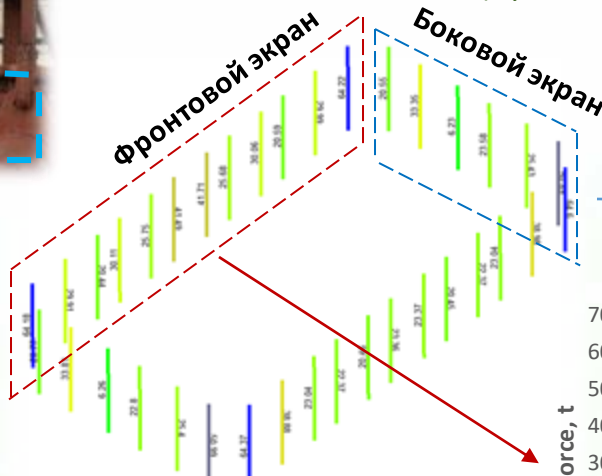
система подвесок

котел



**НЕРАВНОМЕРНОЕ  
распределение нагрузок**

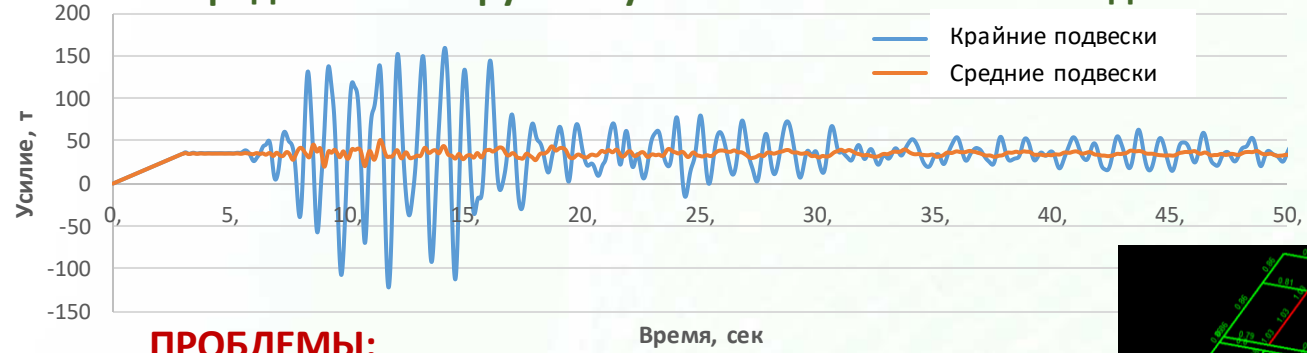
Распределение статических нагрузок  
(с учетом жесткости перекрытия)



■ усилия в подвесках    ■ проектный уровень

3D-визуализация деформаций перекрытия от статических нагрузок

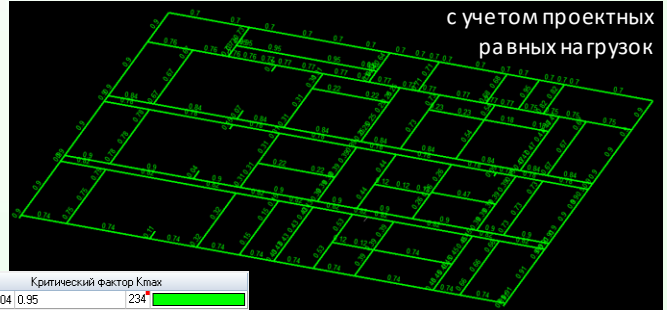
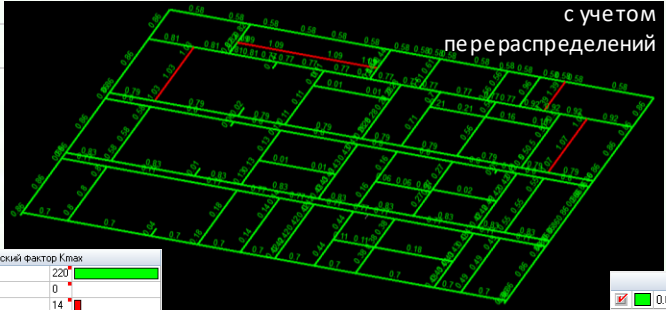
Распределение нагрузок с учетом сейсмического воздействия



**ПРОБЛЕМЫ:**

- ✓ высокая неравномерность распределения
- ✓ полная разгрузка с ударными эффектами
- ✓ перегрузка балок перекрытия

**ПЕРЕГРУЗКА ОТДЕЛЬНЫХ БАЛОК ПЕРЕКРЫТИЯ В СТАТИКЕ:**

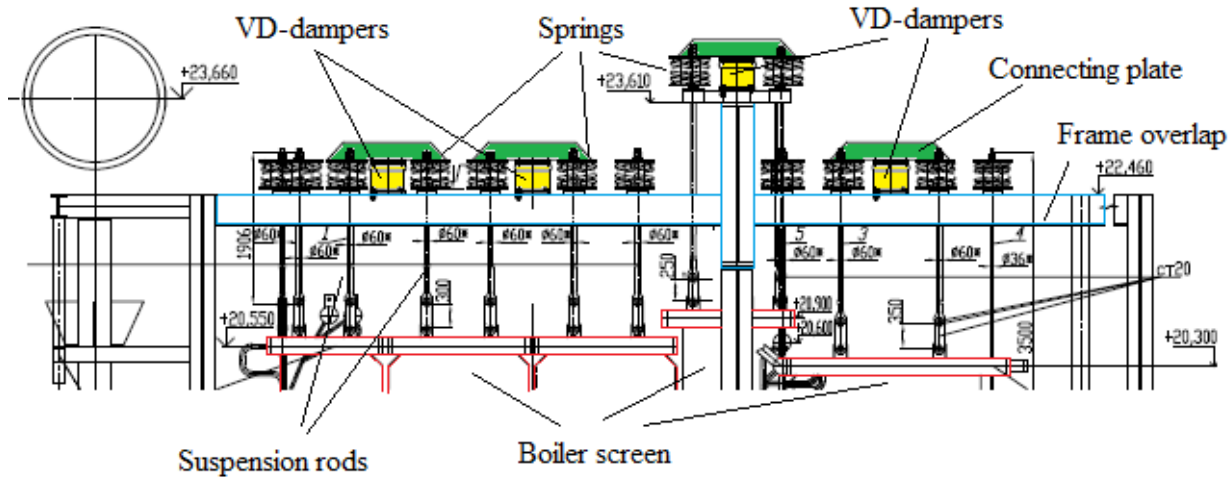


Критический фактор Клmax	
0.01 0.99	220
0.99 1.01	0
1.01 1.39	14

Критический фактор Клmax	
0.04 0.95	234

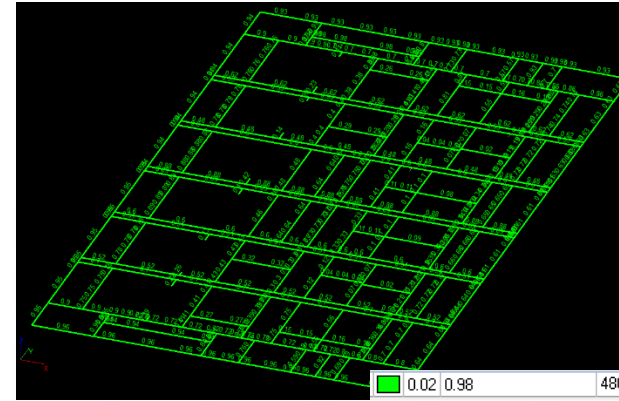


# ПРИМЕНЕНИЕ ВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ СОВМЕСТНО С ПРУЖИНАМИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ПЕРЕКРЫТИЯ

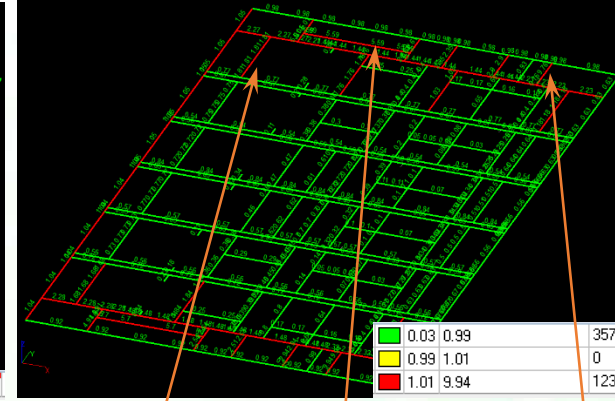


Принципиальная схема установки вязких демпферов

Сравнение распределения напряжений в перекрытии (коэффициенты использования несущей способности)



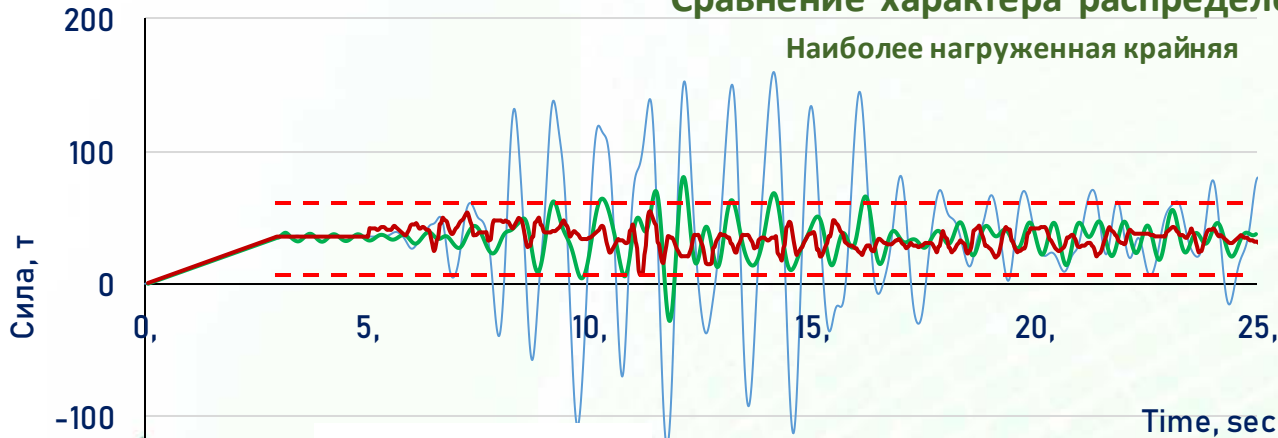
с учетом демпферов



без демпферов

Сравнение характера распределения усилий в подвесках

Наиболее нагруженная крайняя



- «жесткие» подвески
- подвески с пружинами
- подвески с пружинами и демпферами ВД

по фронтальному экрану



по боковому экрану



Демпферы исключают резонансный рост усилий

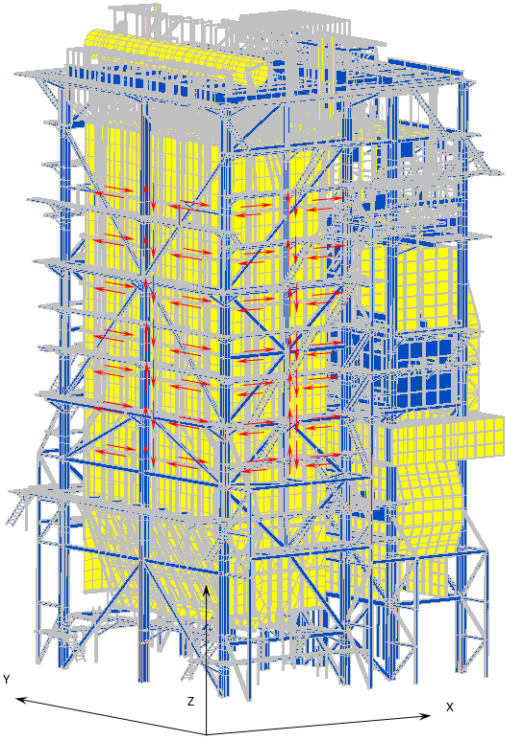


ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»

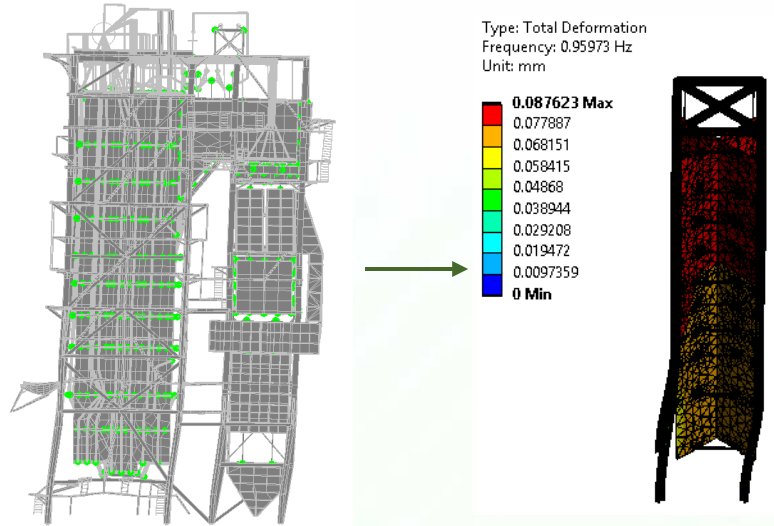


# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ НА УРОВЕНЬ ДЕМПФИРОВАНИЯ



Зоны с высоким уровнем трения

## Анализ эквивалентных моделей



- ✓ соответствие модальных откликов
- ✓ упрощенное моделирование конструкций
- ✓ уточненное моделирование контактов

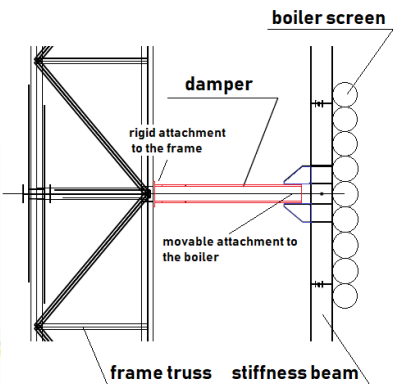
## РЕЗУЛЬТАТЫ:

- ✓ Конструкционное демпфирование - 5%.
- ✓ Эквивалентное демпфирование - до 6.3%.
- ✓ Суммарное демпфирование - 11.3%.

## Анализ свободных колебаний (от действия импульса)



## Влияние вертикальной компоненты



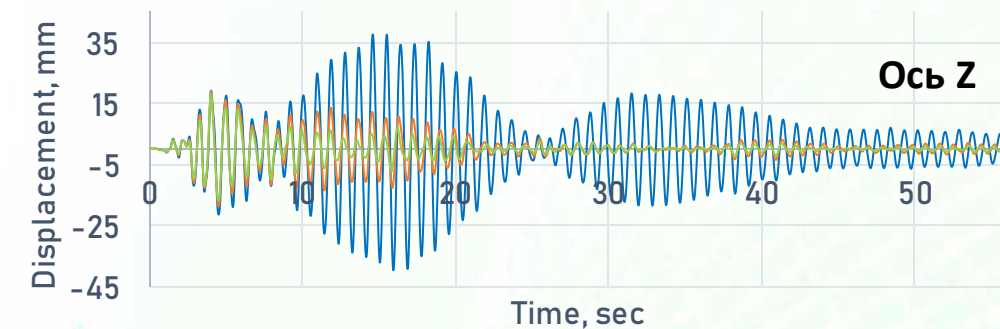
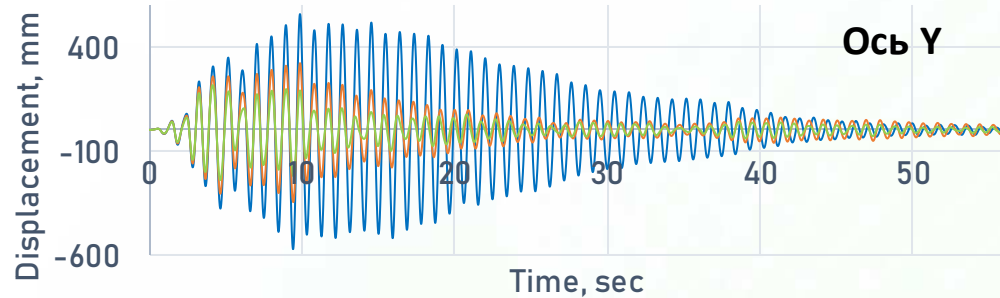
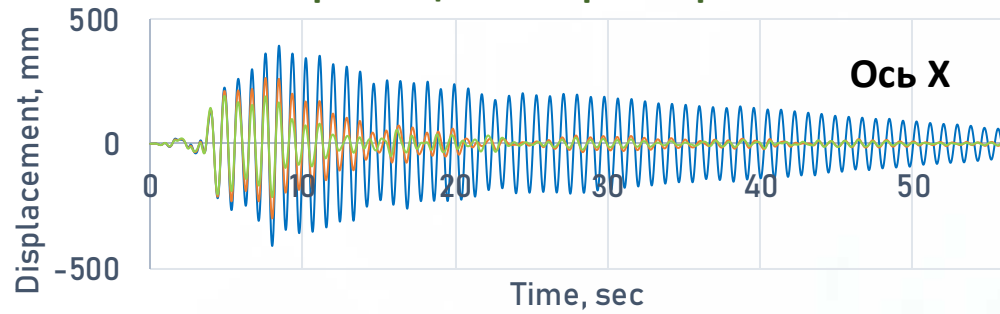
ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»



# ВЛИЯНИЕ СУХОГО ТРЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

Перемещение верха каркаса



Демпфирование: — 1% — 5% — 11.3%



Параметр	Без трения ( $\xi - 5\%$ )	С трением ( $\xi - 11\%$ )	Снижение, %
Горизонтальные перемещения верха каркаса			
$d(x)$ , mm	226	171	<b>-24.3%</b>
$d(y)$ , mm	318	214	<b>-32.7%</b>
$d$ , mm	358	247	<b>-31%</b>
Продольные усилия			
$N$ , t	1248.8	959	<b>-23.2%</b>
Усилия в опорных частях колонн			
$R$ , t	879.4	673.2	<b>-23.4%</b>
$Q_y$ , t	26.8	18.3	<b>-31.7%</b>
$Q_x$ , t	180.9	125.2	<b>-30.8%</b>
$M_y$ , tm	457	320.6	<b>-29.8%</b>
$M_x$ , tm	80.6	62.2	<b>-22.8%</b>
Продольные усилия в подвесках / поперечные силы в перекрытии			
$R_z$ , t	70.4	58.1	<b>-17.6%</b>

Направление	Снижение величин перемещений, %		
	$\xi - 1\% \rightarrow \xi - 5\%$	$\xi - 5\% \rightarrow \xi - 11.3\%$	$\xi - 1\% \rightarrow \xi - 11.3\%$
X-axis	33	29	51
Y-axis	42	33	61
Z-axis	53	10	57

Учет трения позволяет обоснованно **снизить** сейсмические перемещения и усилия **до 15...35%**.



# ВЫВОДЫ

- ✓ Оценка сейсмостойкости каркасов подвесных котлов предполагает рассмотрение **СИСТЕМЫ «КАРКАС-КОТЕЛ»** и учет целого ряда **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ** наряду с требованиями прочности и устойчивости элементов металлоконструкций.
- ✓ Использование **УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСКРЕПЛЕНИЯ** позволяет уменьшить смещения котла при сейсмическом воздействии. Их количество и схема размещения зависят от сейсмического воздействия. Снижение смещений котла и напряжений в подвесках при использовании гистерезисных демпферов составляет более 50%.
- ✓ **ВЯЗКИЕ ДЕМПФЕРЫ** наиболее эффективны для регулирования сейсмических реакций в подвесной системе котла. Они обеспечивают приемлемый уровень нагрузки при сейсмическом воздействии, предотвращают ударные воздействия.
- ✓ Конструктивные особенности соединений элементов в системе предполагают наличие **СУХОГО ТРЕНИЯ**, которое способствует рассеянию энергии и фактически увеличивает демпфирование в системе на величины, сопоставимые с конструкционным демпфированием. Это позволяет обоснованно снизить сейсмические напряжения и деформации в конструкциях на величины до 40%.



**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**



**CKTI-VIBROSEISM**

A STRUCTURAL-MECHANICAL CONSULTING ENGINEERING FIRM



**ВТОРОЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАСТРОЙКИ И БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ»**

**АНУЩЕНКО АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ**

Ведущий инженер

ООО «ЦВС», г. Санкт-Петербург, Россия

[AAnushchenko@cvs.spb.su](mailto:AAnushchenko@cvs.spb.su)

[www.cvs.spb.su](http://www.cvs.spb.su)