



УДК 624.94:624.075

А. М. АНУЩЕНКО, ведущий инженер

**ВЛИЯНИЕ СУХОГО ТРЕНИЯ В КОНТАКТАХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «КАРКАС – КОТЕЛ» НА ДИНАМИЧЕСКУЮ РЕАКЦИЮ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

ООО «ЦВС»

Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 9. Тел. +7 (812) 327-85-99; эл. почта: cvs@cvs.spb.su

*Ключевые слова:* система «каркас – котел», сейсмическая нагрузка, сухое трение.

---

*Сухое трение в контактах между конструктивными элементами системы «каркас-котел» может вносить существенный вклад в диссипацию энергии при сейсмическом воздействии. Игнорирование указанного явления приводит к излишне консервативным результатам оценки сейсмостойкости. На основе численного анализа осуществлен расчет величины эквивалентного вязкого демпфирования от сил сухого трения для системы «каркас – котел» и определено его влияние на динамическую реакцию системы.*

---

Конструктивные системы «каркас – котел» могут иметь большое количество контактов с сухим трением, которые способствуют поглощению энергии при сейсмическом воздействии [1].

В настоящее время в нормативных документах и научных исследованиях для систем «каркас – котел» с учетом наличия тепловой изоляции, конструктивных особенностей экранов, подвесной системы котла, систем трубопроводов и газовоздуховодов для расчетов сейсмостойкости принимается демпфирование 0.05 в долях от критического [2]. При этом сухое трение в контактах элементов игнорируется. С одной стороны, это обеспечивает дополнительную консервативность расчетов, с другой, не выполняется требование ГОСТ [3] об учете характера взаимодействия между конструкциями, и, как следствие, разрабатываются более материалоемкие проектные решения.

Подвесные паровые котлы, как правило, имеют систему раскрепления с колоннами каркаса. Для негазоплотного котла элементы раскрепления через связи с балками жесткости котла обеспечивают его свободное перемещение по вертикали. Одновременно с этим экраны котла имеют шарнирные связи с балками жесткости, обеспечивающие линейные горизонтальные смещения. В указанных зонах (рис. 1а цв. вклейки) наблюдается трение, которое не учитывается в КЭ-моделях в связи с существенной нелинейностью и необходимостью детального моделирования контактных взаимодействий, что требует значительных вычислительных ресурсов.

Для анализа влияния эффекта сухого трения на демпфирование в системе «каркас – котел» с учетом рекомендаций [4] была разработана упрощенная пространственная модель с аналогичным модальным откликом реальной системы (рис. 1б цв. вклейки). Численный анализ свободных колебаний, вызываемых приложением импульсной нагрузки, осуществлялся в модуле задач динамики *Transient Structural* программного комплекса ANSYS.



Пространственная модель представляет из себя две ортогональные П-образные рамы с подвешенным элементом, моделирующим топку котла, соединенным со стойками на отметках связей балок жесткости с колоннами реальной конструкции. Между стойками и «котлом» вдоль оси  $X$  обеспечивается трение в вертикальном направлении, вдоль оси  $Y$  – в горизонтальном направлении. Таким образом, вводимые контакты с трением обеспечивают гашение свободных колебаний по направлению  $X$ , а в направлении  $Y$  при отсутствии диссипативных явлений свободные колебания имеют незатухающий характер.

В терминах перемещений ( $u$ ) системы для затухающих колебаний с учетом сухого трения эквивалентное демпфирование на каждом цикле (между  $i$  и  $i+1$  циклами) может быть выражено следующим образом [5–6]:

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{u_i - u_{i+1}}{u_i}, \quad 1)$$

при этом предполагается, что в системе отсутствует конструкционное демпфирование.

Для системы с конструкционным демпфированием и трением в элементах может быть получена величина эквивалентного вязкого демпфирования, выражаемая для  $j$ -числа пиков между  $i$ -м и  $(i+j)$ -м колебанием системы следующим образом [7]:

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}. \quad 2)$$

Анализ свободных колебаний при действии импульсной нагрузки с соотношением усилий, соответствующим трехкомпонентному сейсмическому воздействию ( $F_x : F_y : F_z = 1 : 1 : 0.67$ ), показал следующее:

– в условиях отсутствия конструкционного демпфирования импульсная нагрузка вызывает линейно затухающие колебания по направлению  $X$ ; по направлению  $Y$  колебания не затухают (рис. 2 цв. вклейки); величина эквивалентного демпфирования составляет 0.03–0.07 в долях от критического;

– в условиях наличия конструкционного демпфирования (0.05 в долях от критического по [2]) импульсная нагрузка вызывает экспоненциально затухающие колебания (рис. 3 цв. вклейки) в обоих направлениях; величина эквивалентного демпфирования по направлению  $X$  (где действуют силы трения) составляет 0.095–0.113 в долях от критического; затухание колебаний по направлению  $Y$  (где отсутствуют силы трения) составляет 0.055–0.056 в долях от критического.

С учетом полученных результатов численного моделирования величина демпфирования в конструктивной системе «каркас – котел» от действия сил сухого трения может быть принята равной 0.05 в долях от критического. Суммарное демпфирование с учетом рекомендованного конструкционного демпфирования по нормам [2] составляет 0.1 в долях от критического.

В программном комплексе *SCAD Office* выполнен прочностной расчет по линейно-спектральной методике системы «каркас – котел» на сейсмическое воздействие ( $PGA = 0.2g$ ) с учетом 5 %-ного спектра воздействия («без трения» – в системе не учитывается сухое трение, действует конструкционное

**К СТАТЬЕ А. М. АНУЩЕНКО**  
**«ВЛИЯНИЕ СУХОГО ТРЕНИЯ В КОНТАКТАХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ**  
**«КАРКАС – КОТЕЛ» НА ДИНАМИЧЕСКУЮ РЕАКЦИЮ КОНСТРУКЦИЙ**  
**ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ»**

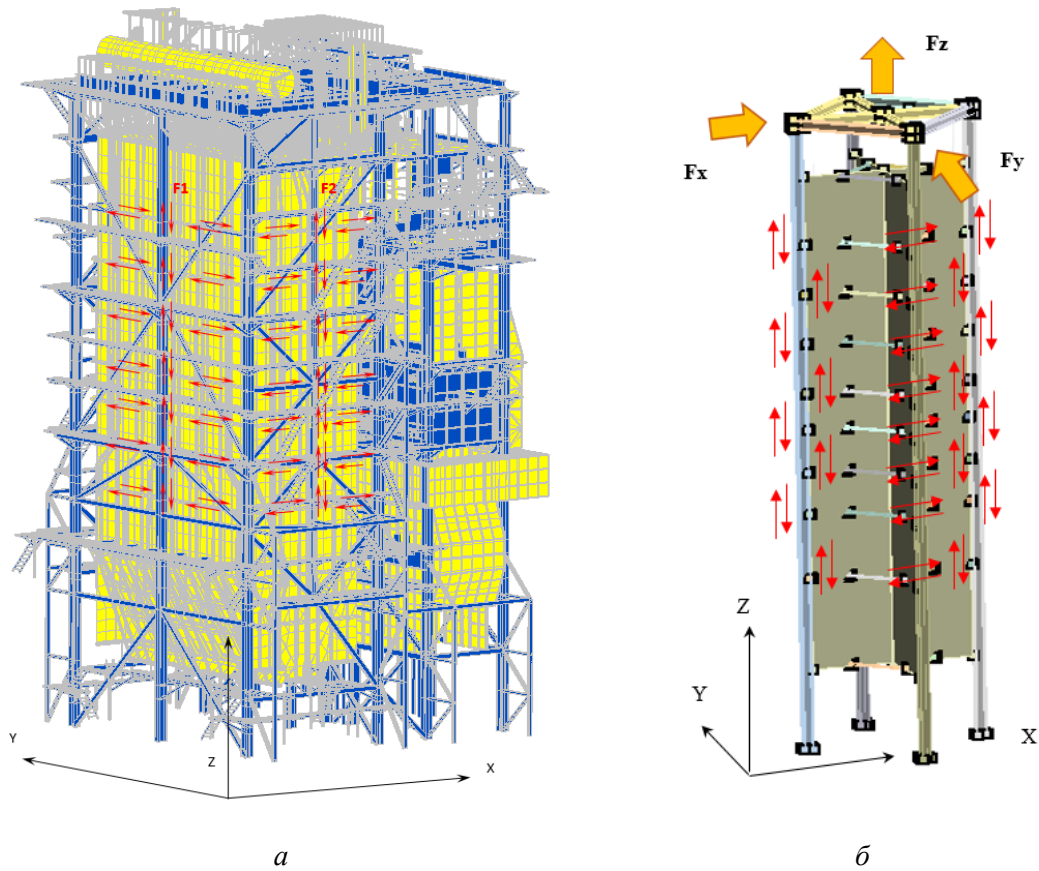


Рис. 1. Система «каркас – котел»: *а* – подробная пространственная КЭ-модель с указанием зон с сухим трением; *б* – упрощенная модель для оценки влияния сухого трения в контактах (направления сил трения показаны красными стрелками)

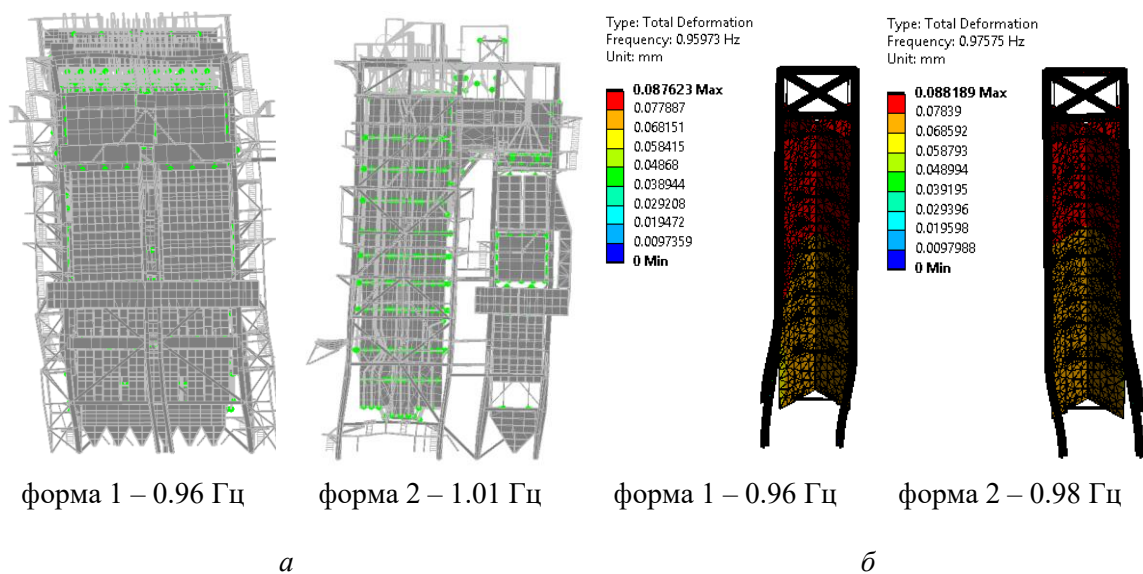


Рис. 2. Первые формы колебаний пространственной (*а*) и упрощенной (*б*) моделей

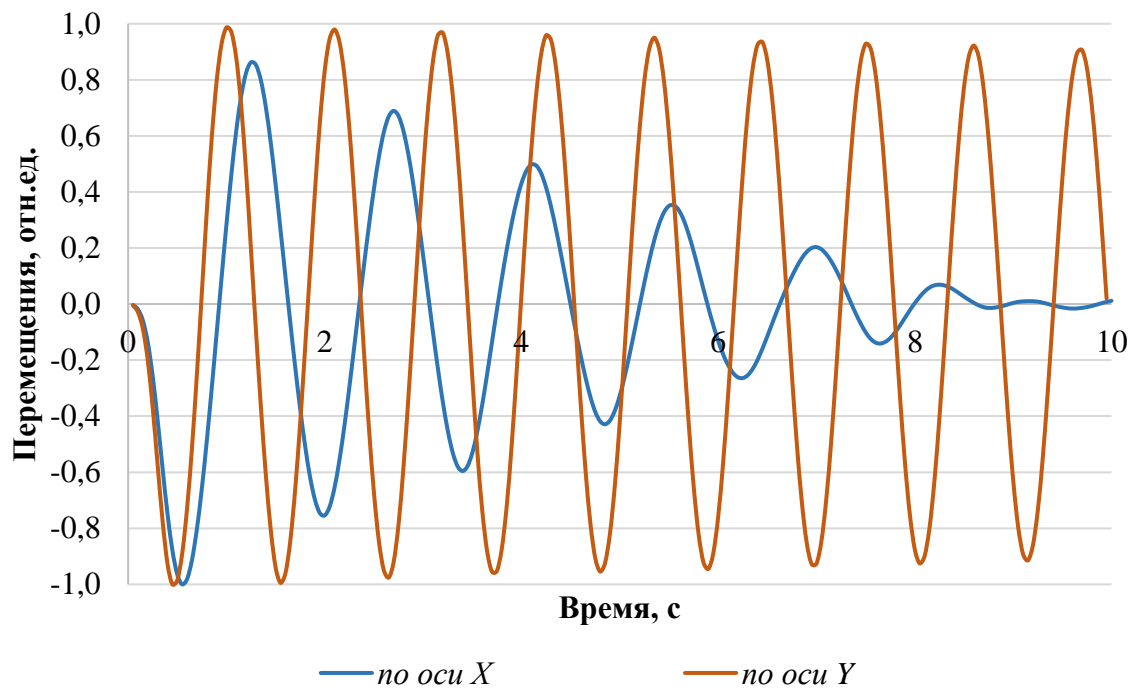


Рис. 3. Свободные колебания системы при действии импульсной нагрузки  $F_x : F_y : F_z = 1 : 1 : 0.67$  (конструкционное демпфирование отсутствует)

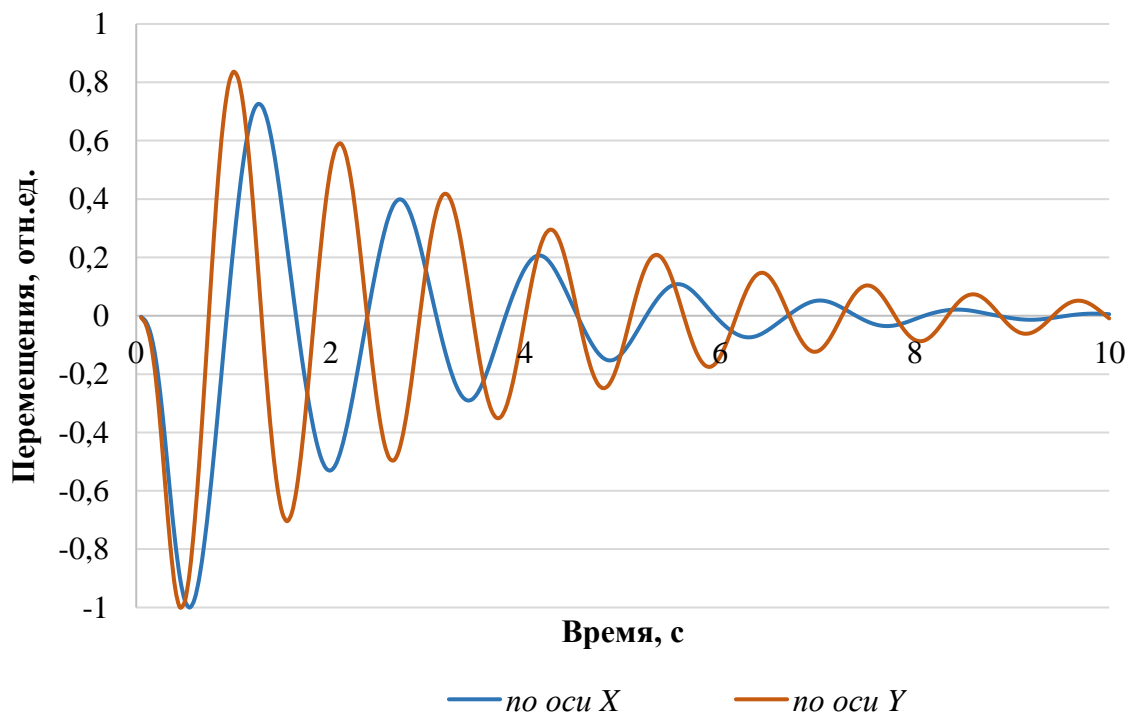


Рис. 4. Свободные колебания системы при действии импульсной нагрузки  $F_x : F_y : F_z = 1 : 1 : 0.67$  (конструкционное демпфирование – 5 %)

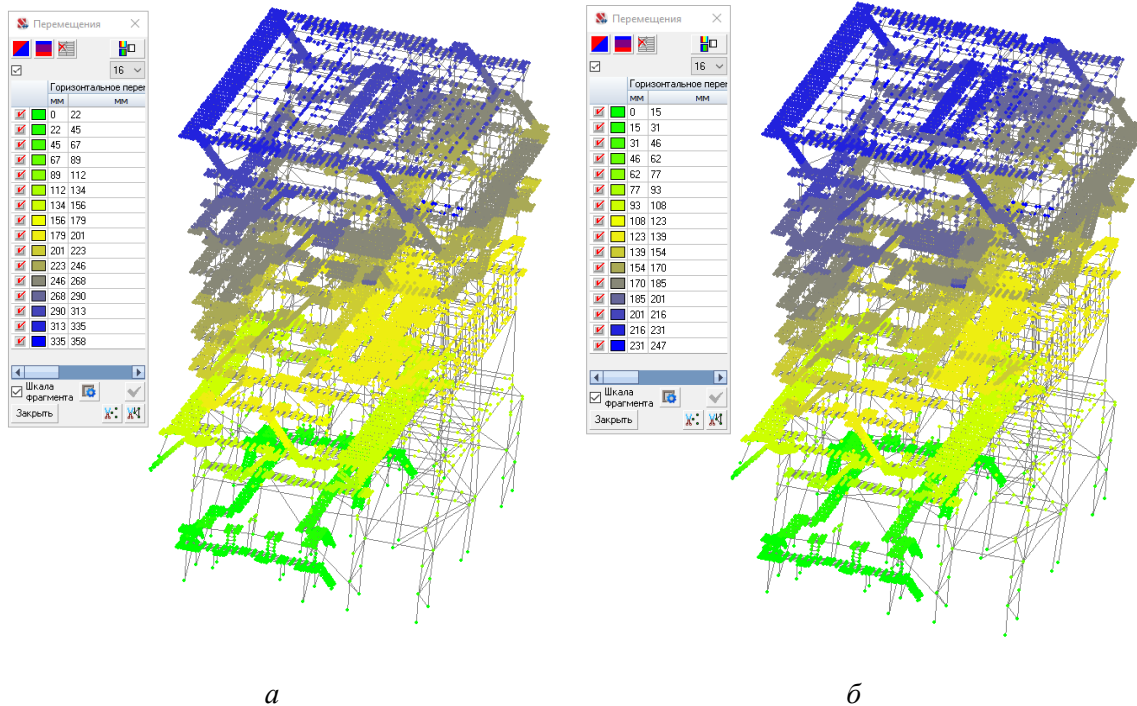


Рис. 5. Горизонтальные перемещения элементов каркаса при разном уровне демпфирования: а – 5 %-ное демпфирование (без трения); б – 10 %-ное демпфирование (с трением)

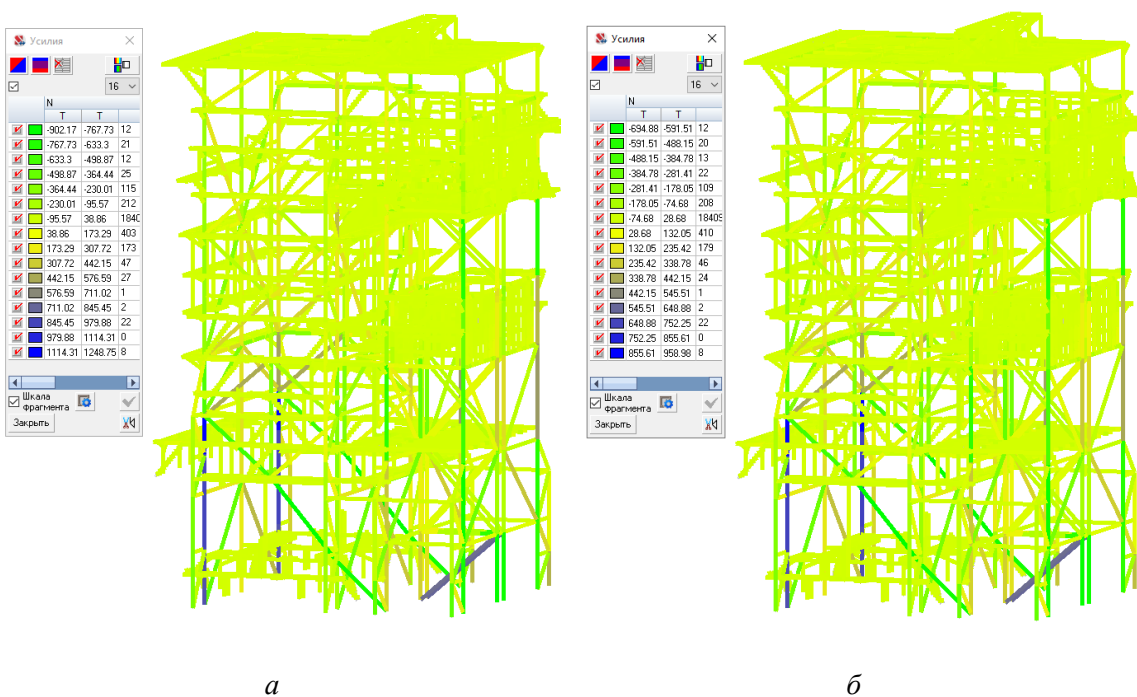
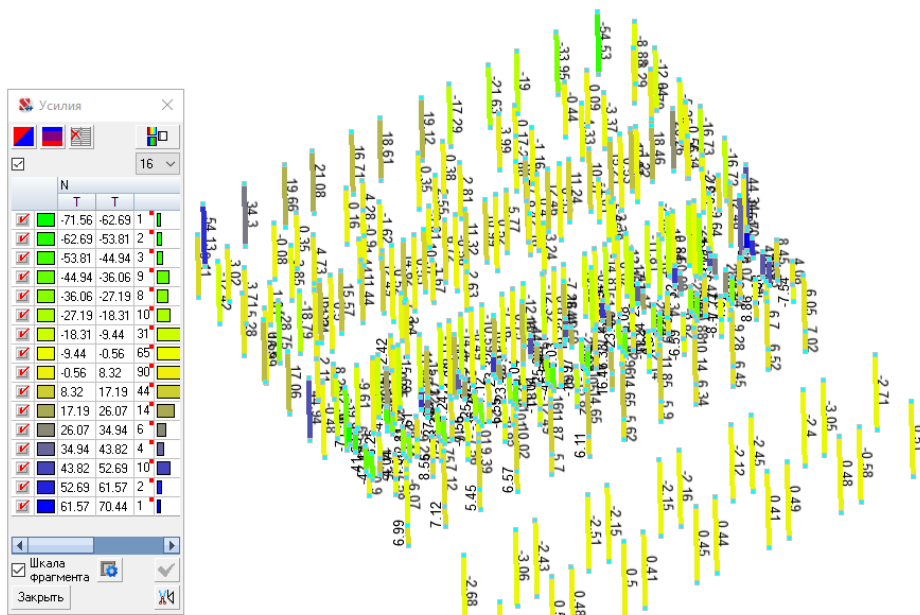
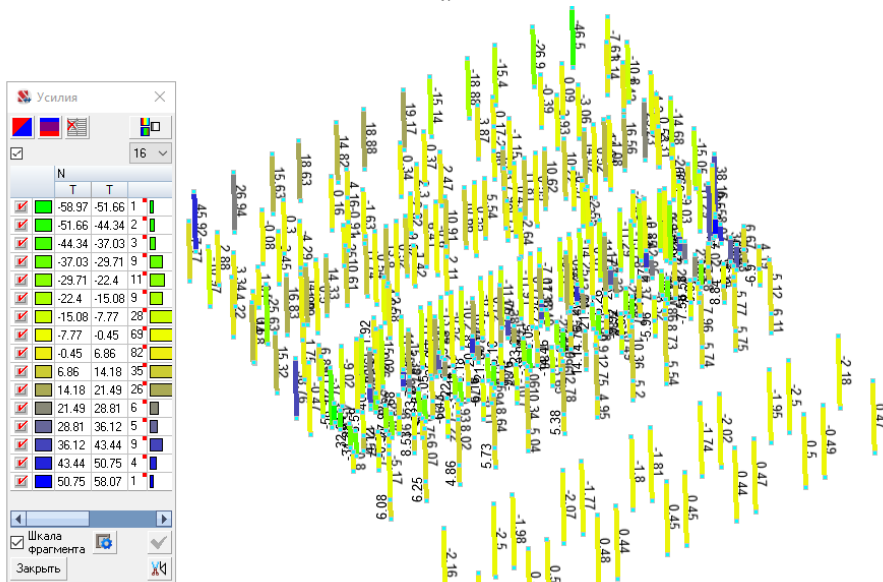


Рис. 6. Продольные усилия в элементах каркаса при разном уровне демпфирования: а – 5 %-ное демпфирование (без трения); б – 10 %-ное демпфирование (с трением)





а



б

Рис. 7. Усилия в подвесной системе при разном уровне демпфирования: а – 5 %-ное демпфирование (без трения); б – 10 %-ное демпфирование (с трением)



демпфирование 0.05 в долях от критического) и 10 %-ного спектра воздействия («с трением» – в системе учитывается сухое трение, учитывается суммарное демпфирование 0.1 в долях от критического).

Максимальные величины горизонтальных перемещений  $d$  (рис. 5 цв. вклейки), в том числе по направлениям осей  $X - d(x)$  и  $Y - d(y)$ , продольных усилий  $N$  в конструктивных элементах каркаса (рис. 6 цв. вклейки) и подвесках  $R_z$  (рис. 7 цв. вклейки), продольных  $R$  и поперечных  $Q_y, Q_x$  усилий и изгибающих моментов  $M_y, M_x$  в приопорных зонах колонн, полученные по результатам расчетов, представлены и проанализированы в таблице.

### Сравнение напряженно-деформированного состояния системы «каркас – котел» для случаев «без трения» и «с трением»

Параметр	Расчет: «без трения»	Расчет: «с трением»	Изменение, $\Delta$ , %
Относительные перемещения верха колонн каркаса			
$d(x)$ , мм	226	171	-24.3%
$d(y)$ , мм	318	214	-32.7%
$d$ , мм	358	247	-31%
Продольные усилия в элементах каркаса			
$N$ , т	1248.8	959	-23.2%
Усилия в колоннах (приопорная часть)			
$R$ , т	879.4	673.2	-23.4%
$Q_y$ , т	26.8	18.3	-31.7%
$Q_x$ , т	180.9	125.2	-30.8%
$M_y$ , тм	457	320.6	-29.8%
$M_x$ , тм	80.6	62.2	-22.8%
Растягивающие усилия в подвесках			
$R_z$ , т	70.4	58.1	-17.6%

#### Выводы:

1. Сухое трение может существенно влиять на демпфирование в системе «каркас – котел» и не должно игнорироваться при расчетных обоснованиях сейсмостойкости.

2. В связи с тем, что контактные задачи с трением являются нелинейными, целесообразно производить оценку влияния трения на диссипацию энергии системы с применением эквивалентных упрощенных расчетных моделей. В пространственных моделях влияние трения учитывается посредством введения эквивалентного относительного демпфирования.

3. При обоснованном увеличении общего демпфирования системы с учетом явления сухого трения до 10 % (от уровня 5 % согласно нормативных требованиям) наблюдается значительное снижение перемещений и усилий в элементах каркаса и подвесной системе котла:

- относительные горизонтальные перемещения верха колонн, определяющие общую устойчивость системы, снижаются на величину порядка 30 %;
- продольные усилия в элементах каркаса уменьшаются на величину не менее 20 %;
- растягивающие усилия в подвесках котла снижаются на величину более 15 %;
- усилия в базах колонн снижаются в диапазоне 20–30 %.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рутман, Ю. Л. Динамика сооружений : сейсмостойкость, сейсмозащита, ветровые нагрузки: монография / Ю. Л. Рутман, Н. В. Островская. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – 253 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ 33963-2016. Котлы стационарные. Расчеты на сейсмическое и ветровое воздействия : межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Росстандарта от 14 марта 2017 г. N 126-ст : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01 июля 2018 г. – URL: <http://www.consultant.ru> <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 14.10.2023). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф (ННГАСУ). – Текст : электронный.
3. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. N 1974-ст : дата введения 01 июля 2015 года. – URL: <http://www.consultant.ru> <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 14.10.2023). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф (ННГАСУ). – Текст : электронный.
4. Optimum design of connecting elements in complex structures and its application to aseismic design of boiler plant structures / Nishida E., Suzuki K., Yasuda T., Ohwa Y. // Earthquake engineering : tenth world conference. – 1992. – P. 2167–2172.
5. Various types of dry friction characteristics for vibration damping / Pust L. [et al.] // Engineering Mechanics. – 2011. – Vol. 18. – № 3/4. – P. 203–224. – Corpus ID: 135833180.
6. Бутиков, Е. И. Осциллятор с сухим трением. II. Вынужденные колебания на нерезонансных частотах / В. И. Бутиков. – Текст : непосредственный // Компьютерные инструменты в образовании. – 2015. – № 2. – С. 33–48.
7. ГОСТ 57364-2016 Устройства антисейсмические. Правила проектирования : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 декабря 2016 г. N 2048-ст : дата введения 01 июля 2017 года. – URL: <http://www.consultant.ru> <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 14.10.2023). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф (ННГАСУ). – Текст : электронный.
8. Chopra, A. K. Dynamics of Structures : theory and applications to earthquake engineering. Pearson Education / A. K. Chopra. – Fourth edition. – 2012. – 944 p.

**ANUSHCHENKO Aleksandr Mikhaylovich, leading engineer**

### **THE DRY FRICTION EFFECT IN CONTACTS OF THE "FRAME – BOILER" SYSTEM ON THE DYNAMIC REACTION OF STRUCTURES UNDER SEISMIC IMPACTS**

JSC “CVS”

9, Gzhatskaya St., Saint-Petersburg, Russia. 195220. Tel.: +7 (812) 327-85-99; e-mail: [cvc@cvs.spb.su](mailto:cvc@cvs.spb.su)

*Key words:* “frame-boiler” system, seismic load, dry friction.

---

*Dry friction in contacts between structural elements of the “frame-boiler” system can make a significant contribution to the energy dissipation during seismic action. Ignoring this phenomenon leads to excessively conservative results of the seismic resistance assessment. On the basis of numerical analysis, the calculation of the equivalent viscous damping from dry friction forces for the “frame-boiler” system was carried out and its effect on the dynamic reaction of the system was determined.*





## REFERENCES

1. Rutman Yu. L. Ostrovskaya N. V. Dinamika sooruzheniy: seysmostoykost, seysmozashchita, vetrovye nagruzki [Dynamics of structures: earthquake resistance, seismic protection, wind loads]: monograf. – Saint-Petersburg: Sankt-Peterburg. gos. arkhitektur.-stroit. un-t, 2019. – 253 p.
2. GOST 33963-2016. Kotly statsionarnye. Raschyoty na seismicheskoe i vetrovoe vozdeystviya [Stationary boilers. Calculations for seismic and wind impacts] : mezhgosudar. Standart : vved. v deystvie Prikazom Rosstandarta ot 14 marta 2017 g. N 126-st : vved. v deystvie v kachestve natsionalnogo standarta Rossiyskoy Federatsii s 01 iyulya 2018 g. – URL: <http://www.consultant.ru> <http://www.consultant.ru> (data obrascheniya: 14.10.2023). – Rezhim dostupa: KonsultantPlyus. Zakonodatelstvo. VersiyaProf (NNGASU).
3. GOST 27751-2014. Nadyozhnost stroitelnykh konstruktsiy i osnovaniy. Osnovnyye polozheniya [Reliability of building structures and foundations. Basic provisions] mezhgosudar. Standart : vved. v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 11 dekabrya 2014 g. N 1974-st : data vved. 01 iyulya 2015 goda. – URL: <http://www.consultant.ru> <http://www.consultant.ru> (data obrascheniya: 14.10.2023). Rezhim dostupa: KonsultantPlyus. Zakonodatelstvo. VersiyaProf (NNGASU).
4. Nishida E., Suzuki K., Yasuda T., Ohwa Y. Optimum design of connecting elements in complex structures and its application to aseismic design of boiler plant structures. Earthquake Engineering, Tenth World Conference, 1992. P. 2167– 2172.
5. Pust L. et al. Various types of dry friction characteristics for vibration damping, 2011. Engineering Mechanics, Vol. 18, 2011, № 3/4, p. 203–224 Corpus ID: 135833180.
6. Butikov E. I. Ostsillyator s sukhim treniem. II. Vynuzhdennyye kolebaniya na nerezonansnykh chastotakh [Dry friction oscillator. II. Forced oscillations at non-resonant frequencies] / Kompyuternyye instrumenty v obrazovanii [Computer tools in education]. – 2015. – № 2. – P. 33–48.
7. GOST 57364-2016 Ustroystva antiseysmicheskoy obratnoy svyazi. Pravila proektirovaniya [Antiseismic devices. Design rules] : natsionalny standart Ross. Fed. : utverzhd. i vved. v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 20 dekabrya 2016 g. N 2048-st : data vved. 01 iyulya 2017 goda. – URL: <http://www.consultant.ru> <http://www.consultant.ru> (data obrascheniya: 14.10.2023). – Rezhim dostupa: KonsultantPlyus. Zakonodatelstvo. VersiyaProf (NNGASU).
8. Chopra A. K. Dynamics of Structures. Theory and applications to earthquake engineering. Fourth edition. Pearson Education. 2012 – 944 p.

© А. М. Анущенко, 2023

Получено: 05.09.2023 г.