

УДК [621.18:624.014]+550.34

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-5-53-73](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-73)

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Проблемы и особенности расчетов металлических каркасов подвесных котлов ТЭС на сейсмические воздействия

Анущенко Александр Михайлович¹

¹ ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ» (ООО «ЦВС»), ведущий инженер. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация.

Введение. Металлические каркасы подвесных паровых котлов являются ответственными сооружениями, повреждения которых при сейсмических воздействиях могут приводить к крупным техногенным катастрофам с гибелью людей и значительным материальным ущербом.

Задачи обеспечения сейсмостойкости таких объектов в настоящее время осложняется тем, что существует большое число противоречий в нормативных документах, регламентирующих расчеты строительных конструкций и котельного оборудования, отсутствует четкая методология проведения расчетных обоснований в части формирования расчетных схем, учитывающих взаимодействия элементов каркаса и котельного оборудования, определения параметров демпфирования системы «каркас–котел» и технологических требований безопасной работы системы, моделирования элементов антисейсмического раскрепления и демпфирующих устройств.

Цели и задачи. На основании анализа существующего нормативного опыта, научно-экспериментальных исследований, а также с учетом выполненных в различное время специалистами ООО «ЦВС» расчетов для российских и зарубежных (Болгария, Индия, Вьетнам) проектов выработать подходы к оценке сейсмостойкости каркасов котлов и проектированию системы антисейсмического раскрепления.

Методы. В основе методологии выполнения расчетного обоснования сейсмостойкости каркасов подвесных котлов в составе системы «каркас–котел» лежат положения действующей редакции СП 14.13330.2018 по определению расчетных сейсмических нагрузок, учету трехкомпонентного сейсмического воздействия, применению метода прямого динамического анализа при расчетах на контрольное землетрясение. Дополнительно учитываются нормы котлонадзора, развивающие положения строительных сводов правил.

Расчетные обоснования производятся с применением программных комплексов МКЭ SCAD Office и ANSYS.

Исследование и результаты.

Сухое трение в контактных зонах между элементами котла и каркаса может вносить существенный вклад в диссипацию энергии колебаний, сопоставимый с уровнем конструкционного демпфирования системы «каркас–котел»; учет трения может приводить к уменьшению горизонтальных сейсмических перемещений и всех компонент внутренних усилий в элементах каркаса на величины до 15...35%.

Эффективным средством регулирования динамической реакции системы «каркас–котел» являются упругопластические элементы антисейсмического раскрепления, которые могут быть запроектированы с учетом геометрических особенностей системы «каркас–котел» с применением численных методов. Их установка позволяет кратно уменьшать величины относительных перемещений котла и каркаса; варьирование количеством и местами установки

элементов обеспечивает допустимые уровни перемещений при различных уровнях сейсмического воздействия (от 0.1 g до 0.4 g).

Подвесная система котла, связанная с перекрытием каркаса, может иметь крайне неравномерную загрузку. При выравнивании усилий в тросах подвесок на реальном объекте указанная монтажная операция должна быть корректно смоделирована в программном комплексе для анализа работы конструкций. Уточненный КЭ-элементный анализ подвесок позволяет избежать излишне консервативных оценок их напряженно-деформированного состояния, проанализировать работу важных с технологической точки зрения узлов системы, от которых зависит её общая устойчивость.

Заключение. Оценка сейсмостойкости каркасов подвесных котлов предполагает рассмотрение системы «каркас-котел» и учет целого ряда технологических требований наряду с требованиями прочности и устойчивости элементов металлоконструкций. При оценке сейсмостойкости каркасов подвесных котлов принимается более высокий уровень демпфирования, чем рекомендуемый СП 14.13330 для стальных конструкций, в том числе, с учетом гашения колебаний силами трения в контактах элементов системы. Применение упругопластических элементов антисейсмического раскрепления является простым и одновременно достаточно эффективным средством регулирования динамической реакции.

Ключевые слова: система «каркас–котел», металлический каркас, подвесной паровой котел, сейсмостойкость, демпфирование, антисейсмическое раскрепление, КЭ-анализ

Для цитирования: Анущенко А.М. Проблемы и особенности расчетов металлических каркасов подвесных котлов ТЭС на сейсмические воздействия // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 5. С. 53–73.

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-5-53-73](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-73)

Design, building and reconstruction of aseismic constructions

Problems and features of FPP suspended boiler metal framework calculation under seismic impacts

Alexander M. Anushchenko¹

¹LLC “CVS”, Lead Engineer. Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract.

Introduction. Metal frames of suspended steam boilers are responsible structures, damage to which during seismic impacts can lead to major man-made disasters with loss of life and significant material damage.

The tasks of ensuring the seismic resistance of such objects are currently complicated by the fact that there are a large number of contradictions in the regulatory documents regulating the calculations of building structures and boiler equipment, there is no clear methodology for carrying out calculation justifications in terms of forming calculation schemes that take into account the interaction of elements of the frame and boiler equipment, determining the parameters of damping of the frame-boiler system and technological requirements safe operation of the system, modeling of antiseismic bracing elements and damping devices.

Purpose and tasks. Based on the analysis of existing regulatory experience, scientific and experimental research, as well as considering calculations performed at various times by specialists of LLC "CVS" for Russian and foreign (Bulgaria, India, Vietnam) projects, to develop approaches to assessing the seismic resistance of boiler frames and designing an antiseismic bracing system.

Methods. The methodology for performing the calculation justification of the seismic resistance of suspended boiler frames as part of the "frame–boiler" system is based on the provisions of the current

version of SP 14.13330.2018 on determining the calculated seismic loads, considering the three-component seismic impact, using the method of direct dynamic analysis in calculations for a control earthquake. Additionally, the norms of boiler inspection, supplementing and developing the provisions of the building codes of rules, are taken into account.

The calculation justifications are made using the FE software complexes SCAD Office and ANSYS.

Research and results.

Dry friction in the contact zones between the elements of the boiler and the frame can make a significant contribution to the dissipation of vibration energy, comparable to the level of structural damping of the frame-boiler system; considering friction can lead to a decrease in horizontal seismic displacements and all components of internal forces in the elements of the frame by up to 15...35%.

Effective means of regulating the dynamic reaction of the frame-boiler system are elastic-plastic elements of antiseismic bracing, which can be designed considering the geometric features of the frame-boiler system using numerical methods. Their installation makes it possible to multiply reduce the relative displacements of the boiler and the frame; varying the number and places of installation of elements provides acceptable levels of displacement at different levels of seismic impact (from 0.1 g to 0.4 g).

The boiler suspension system associated with the overlap of the frame can have extremely uneven loading. When equalizing the forces in the suspension rods on a real object, the specified installation operation must be correctly modeled in a software package for analyzing the work of structures. The refined FE-element analysis of suspensions allows avoiding excessively conservative estimates of their stress-strain state, analyzing the operation of the system nodes important from a technological point of view, on which its overall stability depends.

Conclusion. The assessment of the seismic resistance of suspended boiler frames involves consideration of the "frame-boiler" system and consideration of a number of technological requirements along with the requirements of strength and stability of elements of metal structures. When assessing the seismic resistance of suspended boiler frames, a higher level of damping is assumed than the recommended SP 14.13330 for steel structures, including considering the damping of vibrations by friction forces in the contacts of the system elements. The use of elastic-plastic elements of antiseismic bracing is a simple and at the same time sufficient means to effectively regulate the dynamic reaction.

Keywords: frame-boiler system, metal frame, suspending steam boiler, earthquake resistance, damping, antiseismic bracing, FE-analysis

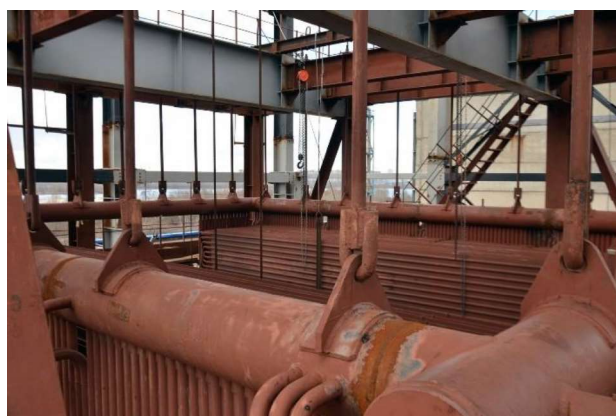
For citation: Anushchenko A.M. Problems and features of FPP suspended boiler metal framework calculation under seismic impacts. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2023, no. 5, pp. 53–73. [In Russian]

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-5-53-73](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-73)

Паровой котел представляет собой подвесную экранную коробку, в которой размещены конвективные поверхности нагрева (пароперегреватели и экономайзеры). Указанные элементы монтируются к балкам перекрытия специально возводимого стального каркаса на подвески, состоящие из тяг и блоков винтовых или тарельчатых пружин (рисунок 1). К котлу подводится большое число трубопроводов и коробов, часть из которых также крепится к конструкциям каркаса. В уровнях площадок обслуживания и в зонах горизонтальных связей каркаса применяются элементы раскрепления, которые должны препятствовать перемещениям котла при сейсмических колебаниях и предотвращать аварийные ситуации, связанные с возможными столкновениями с элементами каркаса [1, 2].



а) общий вид каркаса парового котла
a) general view of the steam boiler frame



б) балки перекрытия и подвесная система
b) floor beams and suspension system

Рисунок 1 – Каркас парового котла подвесного типа

Figure 1 – The frame of a suspended type steam boiler

Габаритные размеры каркасов паровых подвесных котлов определяются технологическими особенностями монтируемого оборудования, и могут достигать нескольких десятков метров в плане и по высоте. Как правило, масса котлакратно превышает массу металлоконструкций каркаса (таблица 1), в связи с чем в расчетной практике при обосновании сейсмостойкости невозможно рассматривать каркас обособленно от элементов котельного оборудования. Для корректного определения динамической реакции важно учитывать особенности распределения масс элементов котла, наличие взаимосвязей между ними и каркасом, их характер и т.д. В итоге требуется рассматривать сложную динамическую систему «каркас-котел» (рисунок 2), в которой с оптимальной точностью моделируются конструкции каркаса (для проведения проверок прочности и устойчивости) и с рядом допущений и упрощений моделируется котельное оборудование (для корректного воспроизведения динамической реакции системы).

Таблица 1 – Объекты, для которых специалистами ООО «ЦВС» разработаны проектные решения по обеспечению сейсмостойкости каркасов паровых котлов

Table 1 – Objects for which specialists of LLC "CVS" have developed design solutions to ensure the seismic resistance of steam boiler frames

Объект	ZPGA, g	Высота, м	Вес, т	
			Котел	Каркас
ТЭС «Бар», Индия	0.24	103.8	17000	7200
ТЭС «Лонг-Фу», Вьетнам	0.06	83.58	10809	4790
ТЭЦ «София», Болгария	0.23	22.46	787	198.3
ТЭС «Советская гавань», Россия	0.20	35.55	1358	470
Невинномысская ГРЭС, Россия	0.10	28.3	1012	272.2
ТЭС (проект), Россия	0.20	65	5872.2	4050.6
ТЭЦ (реконструкция), Россия	0.19	35.7	3272.7	1341.5

Для системы «каркас-котел» необходимо руководствоваться не только строительными сводами правил (СП 20.13330, СП 14.13330, СП 16.13330, СП 294.1325800), но и руководящими документами в сфере котлонадзора (РТМ 108.031.114-85, РТМ 108.031.09-83, РД 10-249-98, ГОСТ 33963-2016), которые, как показывает анализ, не согласованы между собой, что вызывает значительные затруднения при проведении расчетов на сейсмические воздействия.

Во-первых, п. 5.1 СП 14.13330.2018 [3] предполагает игнорирование горизонтальных нагрузок на строительные конструкции от масс на гибких подвесках, что в условиях значительного веса котельного оборудования (таблица 1) и суммарной горизонтальной жесткости подвесной системы является недопустимым.

Во-вторых, строительные нормы [3] предписывают учитывать в металлических конструкциях относительное демпфирование 0.01 в долях от критического, что не согласуется с требованиями ГОСТ 33963-2016 [4] для расчетов оборудования, в котором величины демпфирования зависят от методики расчета, конкретного типа элемента системы и могут существенно варьироваться:

- при расчете по линейно-спектральной методике для всей системы «каркас-котел» принимается относительное демпфирование 0.05;
- поэлементное рассмотрение системы предполагает задание относительного демпфирования 0.01...0.02 для трубопроводов; для газоходов и воздухопроводов – 0.10; для металлоконструкций на сварке – 0.02, на болтах – 0.04.

В-третьих, РТМ 108.031.09-83 [5] устанавливает допускаемые перемещения и деформации всех элементов каркасов котлов в отличие от СП 20.13330.2016 [6], который предлагает исключительно эстетико-психологические требования, не учитывающие технологические особенности работы ТЭС, что является недопустимым, учитывая высокие техногенные риски.

В-четвертых, в РТМ 108.031.09-83 [5] и СП 14.13330.2018 [3] при расчетах по линейно-спектральной методике могут быть приняты различные расчетные коэффициенты для определения сейсмических нагрузок: $k_1 = 0.25$ – по РТМ и $k_1 = 0.22...0.25$ – по СП (в зависимости от конструктивной схемы); $k_{\psi} = 1...1.5$ – по РТМ и $k_{\psi} = 1$ – по СП (в зависимости от высоты колонн и их поперечного сечения), что в конечном итоге может приводить к необоснованному завышению или занижению сейсмических нагрузок на величину до 70%.

Указанные факты подтверждают актуальность работы по разработке единой методики оценки сейсмостойкости каркасов котлов. В рамках данной статьи рассматриваются

выработанные с учетом различных положений норм и научно-экспериментальных исследований подходы к расчетному обоснованию сейсмостойкости систем «каркас-котел», позволяющие на практике преодолеть некоторые проблемные вопросы, в том числе, путем применения средств КЭ-анализа.

В основе методологии выполнения расчетного обоснования сейсмостойкости каркасов подвесных котлов в составе системы «каркас-котел» лежат положения действующей редакции СП 14.13330.2018 по определению расчетных сейсмических нагрузок, учету трехкомпонентного сейсмического воздействия, применению метода прямого динамического анализа при расчетах на контрольное землетрясение. При этом массы котла, трубопроводов и иных элементов оборудования, закреплённых на подвесках, в обязательном порядке учитываются в расчете.

Расчет каркаса котла на расчетное землетрясение (РЗ) производится с целью проверки прочности и устойчивости элементов металлоконструкций в соответствии с положениями СП 16.13330.2017, при этом допускаемые уровни перемещений и деформаций принимаются согласно РТМ 108.031.09-83 [5] на уровне следующих величин:

- горизонтальные перемещения колонн каркаса (на высоте каждого этажа, H) не более $H/400$;
- относительные прогибы хребтовых балок, ригелей потолочного перекрытия, балок опирания барабана не более $1/400$ длины элементы;
- относительные прогибы ригелей и балок экономайзера, опор рам вертикальных элементов обмуровки не более $1/300$ длины элементы;
- относительные прогибы второстепенных балок перекрытия, опор рам горизонтальных элементов обмуровки не более $1/250$ длины элементы;
- относительные прогибы прочих элементов не более $1/200$ длины.

Поскольку в нормативной документации не определены критерии оценки общей устойчивости системы «каркас-котел» в расчетах на контрольное землетрясение (КЗ), то, учитывая необходимость обеспечения безаварийной работы котельного оборудования, рекомендуется рассматривать совместно конструктивные и технологические требования:

- оценивать общую устойчивость каркаса котла в соответствии с СП 16.13330.2017;
- проверять соответствие горизонтальных перемещений элементов котла величинам, обеспечивающим недопущение его столкновения с каркасом при колебаниях;
- проверять соответствие продольных усилий в балках жесткости котла в местах сопряжения с элементами антисейсмического раскрепления допускаемым величинам по СП 16.13330.2017 или заданию от проектировщиков котельного оборудования;
- проверять обеспечение прочности и устойчивости подвесной системы котла в соответствии с РД 10-249-98 [7].

Расчетные обоснования проводятся с применением верифицированных расчетных комплексов, прошедших аккредитацию в Ростехнадзоре. В настоящей статье рассматривается возможность применения программ *SCAD Office* и *ANSYS* для целей КЭ-анализа.

1. Определение параметров демпфирования системы «каркас–котел» и его влияние на динамическую реакцию конструкций

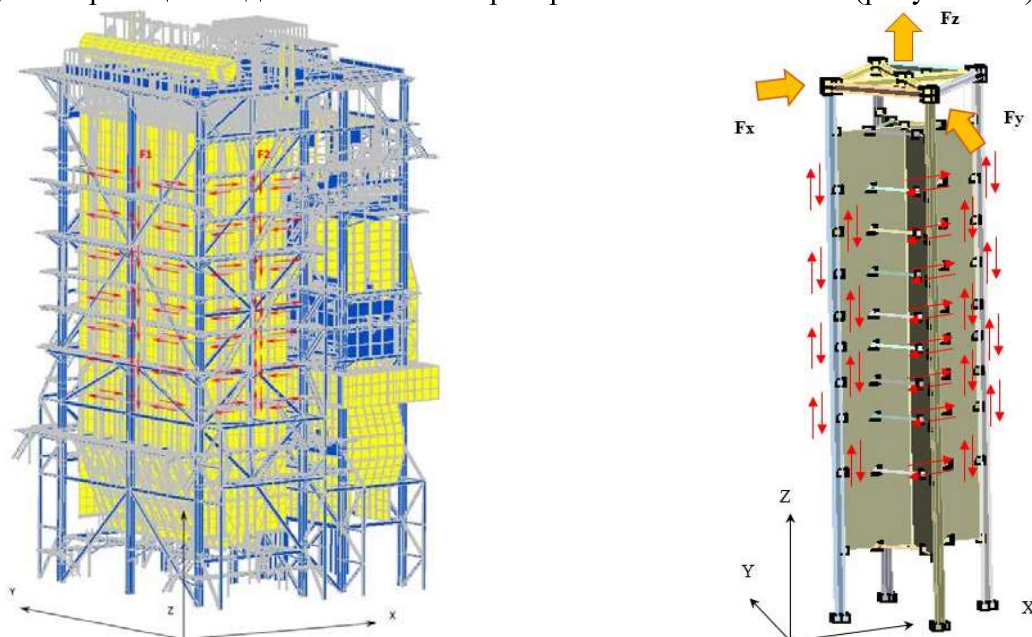
Экспериментально установлено, что конструкционное демпфирование в металлоконструкциях достаточно низкое: составляет $0.001...0.01$ в долях от критического [8]. Принимая указанную величину в качестве демпфирования конструктивной системы, игнорируются многие возможные диссипативные явления, что, с одной стороны, обеспечивает дополнительную консервативность расчетов, а с другой, требует принятия более материалоемких конструктивных решений.

Учитывая положения ГОСТ 33963-2016 для расчетов сейсмостойкости котельного оборудования и опираясь на опыт нормирования уровня демпфирования для объектов

использования атомной энергии НП-031-01 [9] и ASCE 4-16 [10], а также исследования Петрова В.А. и др. (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева) [11], Костарева В.В., Щукина А.Ю., Павлова Д.Ю. и др. (НПО ЦКТИ, ООО «ЦВС») [12, 13], Caughey Т.К. [14], Jangid R. et al. [15], Subramanian K.V. [16] в качестве базового параметра затухания (конструкционного демпфирования) в системе «каркас-котел» с учетом наличия элементов тепловой изоляции, сварных соединений металлоконструкций, влияния жидкости в трубопроводах и экранах может быть принята величина $\xi = 0.05$ в долях от критического в отличие от заданной в СП 14.13330.2018 для металлоконструкций $\xi = 0.01$ (таблица 2).

Одновременно с этим необходимо отметить, что в системе «каркас-котел» наблюдается большое число контактов с сухим трением (рисунок 2 а): зоны взаимодействия вертикальных и горизонтальных поверхностей нагрева, взаимно проходящих друг через друга (змеевики, пароперегреватели); контакты близко расположенных трубопроводов; контакты балок жесткости с экранами котла; контакты балок жесткости с элементами антисейсмического крепления или колоннами каркаса. Обычно трение в контактах не учитывается в расчетах, в том числе, в силу отсутствия такой возможности в ряде расчетных программ строительного проектирования (например, *SCAD Office*), хотя ГОСТ 27751-2014 [17] устанавливает требование о том, что расчетные модели строительных объектов должны отражать действительные условия их работы, в том числе, условия взаимодействия конструктивных элементов между собой и с основанием.

Анализ колебаний механической системы во временной области с учетом трения в контактах является нелинейной задачей и требует значительных вычислительных ресурсов для решения. Реальная система «каркас-котел» имеет большое число составных элементов и контактов с трением, которые требуют детального моделирования. Поэтому оценка влияния сухого трения на демпфирование может выполняться на эквивалентных упрощенных расчетных моделях, повторяющих модальный отклик пространственной системы (рисунок 2 б).



а) пространственная модель в *SACD Office* (с указанием зон с высоким уровнем сухого трения)

б) эквивалентная упрощенная модель в *ANSYS* (с указанием воспроизводимых зон трения)

Рисунок 2 – Расчетные КЭ-модели системы «каркас-котел»

Figure 2 – FE-models of the frame-boiler system

Таблица 2 – Подходы к назначению демпфирования в металлоконструкциях

Table 2 – Approaches to the purpose of damping in metal structures

Авторы / источник	Тип конструкций / конструктивной системы	Демпфирование
СП 14.13330.2018	Металлические конструкции (ГТС)	0.01
	Металлические конструкции (отмененное изм. 1)	0.025
ГОСТ 33963-2016	Система котел–здание (каркас) – расчет по ЛСТ	0.05
	Газоходы и воздухопроводы котлов	0.1
	Трубопроводы диаметром более 100 мм	0.02
	Трубопроводы диаметром менее 100 мм	0.01
	Металлоконструкции сварные	0.02
	Металлоконструкции болтовые	0.04
	НП-031-01	Стальные конструкции сварные при $\sigma = 0.67 R / \sigma \geq 0.9 R$
Стальные конструкции на болтах при $\sigma = 0.67 R / \sigma \geq 0.9 R$		0.04 / 0.07
Оборудование и трубопроводы $d < 300$ мм при $\sigma = 0.67 R / \sigma \geq 0.9 R$		0.019 / 0.03
Оборудование и трубопроводы $d > 300$ мм при $\sigma = 0.67 R / \sigma \geq 0.9 R$		0.01 / 0.019
ASCE 4-16	Конструкции со сварными и фрикционными соединениями	0.02...0.07
	Трубопроводы	0.05
	Конструкции кабельных трасс с заполнением до 50%	0.05...0.15
	Легкие сварные стойки для приборов	0.02...0.03
Петров В.А. и др. (ВНИИГ)	Металлокаркас здания ТЭЦ	0.04
Костарев В.В., Шукин А.Ю. и др. (НПО ЦКТИ)	Система каркас-котел	0.05
Caughey T.K.	Каркасное здание котельной с угольным парогенератором	0.05
Jangid R. et al.	Система «каркас–котел»	0.05
K.V. Subramanian	Стальные каркасные конструкции	0.15
	Сварные узлы	0.07
	Узлы на болтах и заклепках	0.15
	Кабельные лотки	0.10
	Трубопроводы	0.05

С учетом [1] эквивалентная модель может быть образована двумя ортогональными П-образными рамами, к которым подвешен элемент в виде двух перекрестных пластин с раскосами, моделирующий топку котла, соединенный со стойками на отметках, соответствующих отметкам узлов крепления балок жесткости к колоннам реальной конструкции. При этом между стойками и «топкой котла» вдоль оси X в узлах крепления обеспечивается трение в вертикальном направлении, между колоннами и «топкой котла» вдоль оси Y обеспечивается трение в горизонтальном направлении.

Для рассматриваемой системы «каркас–котел» в расчетах принимается постоянный по величине коэффициент трения 0.3, установленный по результатам экспериментальных исследований и рекомендованный в действующих руководящих технических материалах [5] с учетом указаний [8] о близости результатов расчетов для различных моделей сухого трения.

Влияние трения на диссипацию энергии оценивается путем численного анализа свободных колебаний эквивалентной системы [18], вызванных действием импульсной нагрузки, в модуле задач динамики *Transient Structural* программного комплекса *ANSYS*. Вводится параметр эквивалентного демпфирования, которое согласно [19] выражается следующим образом:

$$\xi_{equ} = \frac{W(d_{bd})}{2\pi V_{Ebd} d_{bd}}, \quad (1)$$

где $W(d_{bd})$ – энергия, фактически рассеянная силами трения за цикл;

d_{bd} – максимальное горизонтальное смещение;

V_{Ebd} – расчетная сила, вызывающая смещение d_{bd} .

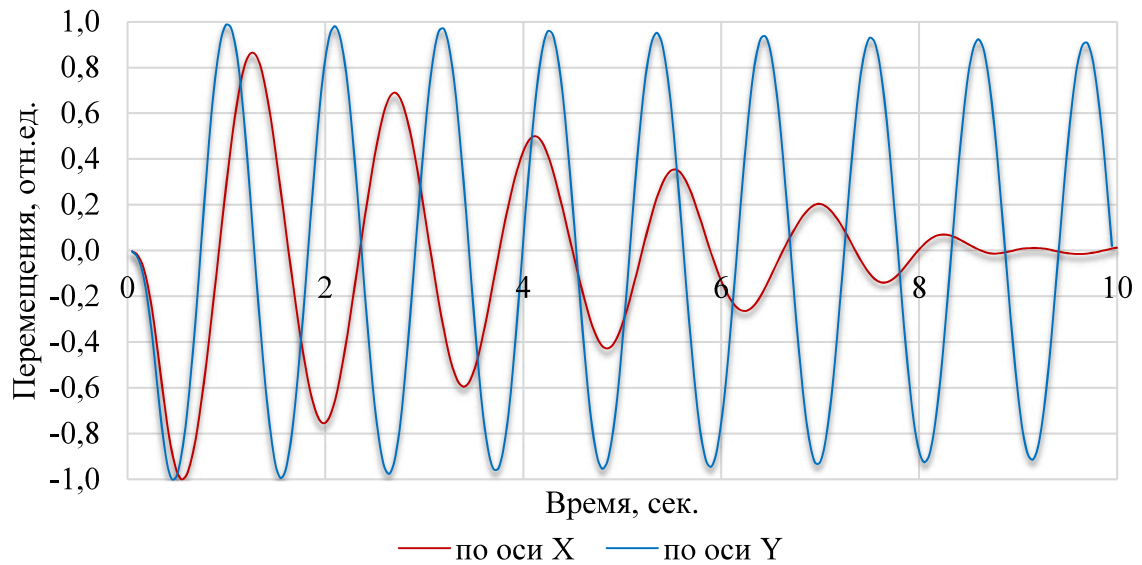
В терминах перемещений (u) системы при вынужденных колебаниях выражение (1) может быть записано для каждого цикла между i и $i+1$ колебанием следующим образом:

$$\xi_{equ} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{u_i - u_{i+1}}{u_i}. \quad (2)$$

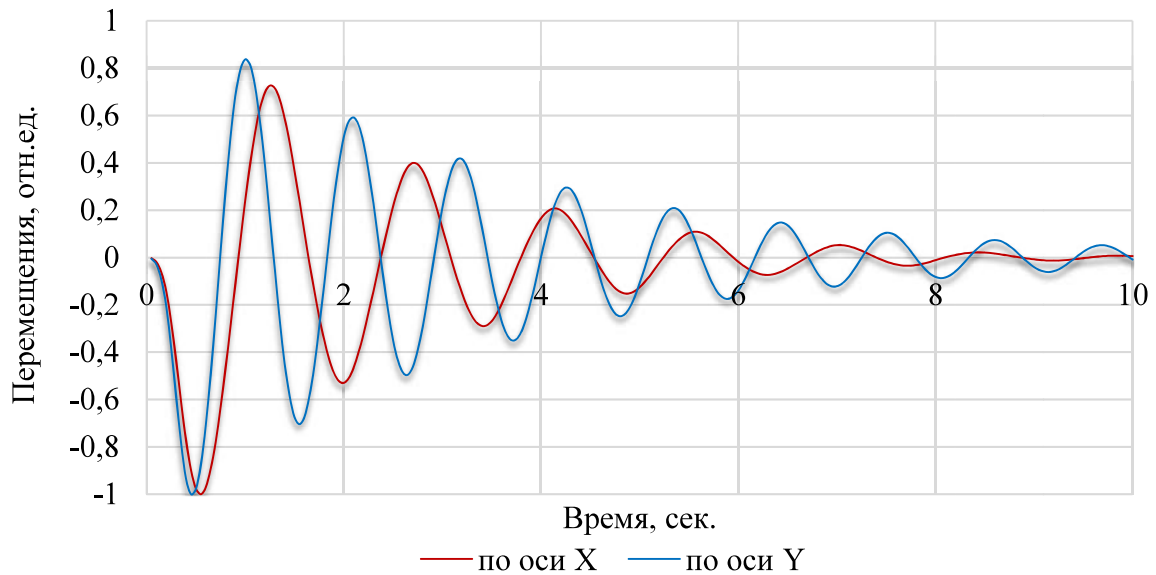
Численный анализ проводился для импульсной нагрузки с сочетанием горизонтальных и вертикальной компонент по аналогии с сейсмическим воздействием $F_x : F_y : F_z = 1 : 1 : 0.67$ для случаев отсутствия (рисунок 3 – а)) и наличия на уровне 0.05 в долях от критического конструкционного демпфирования (рисунок 3 – б)).

По результатам КЭ-анализа эквивалентное демпфирование от трения в контактах элементов составляет $\xi_{equ} = 0.045...0.063$ в долях от критического, т.е. его величина сопоставима с уровнем конструкционного демпфирования. Суммарное демпфирование в системе – $\xi_{sum} = 0.095...0.113$.

В программе *SCAD Office* выполнен расчет на сейсмическое воздействие методом прямого динамического анализа для пространственной расчетной схемы (рисунок 2 – а)) с учетом различного уровня конструкционного демпфирования: 0.01 – по требованиям СП 14.13330.2018; 0.05 – по требованиям ГОСТ 33963-2016; 0.113 – по результатам оценки влияния трения в контактах численными методами. Рисунок 4 иллюстрирует отличие динамической реакции системы в зависимости от уровня демпфирования на примере изменений перемещений верха колонн каркаса (таблица 3).



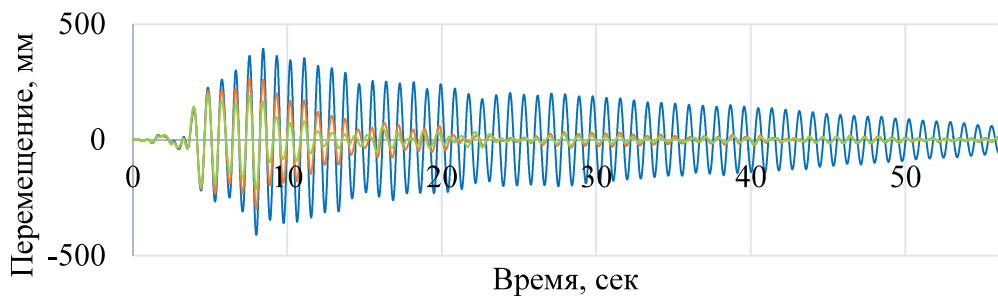
а) для случая без учета конструкционного демпфирования
a) for the case without structural damping



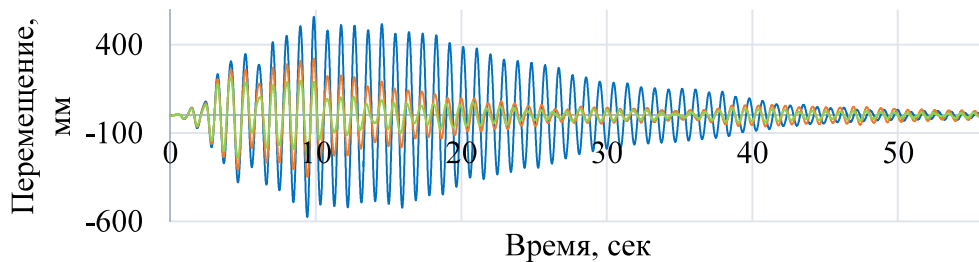
б) для случая с учетом конструкционного демпфирования
b) for the case with structural damping

Рисунок 3 – Свободные затухающие колебания эквивалентной расчетной модели

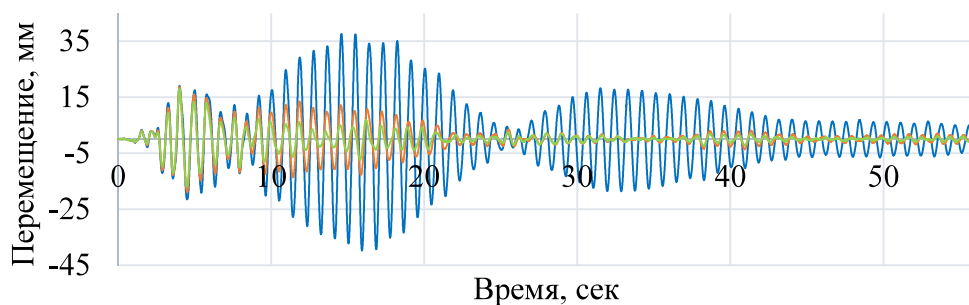
Figure 3 – Free damped oscillations of an equivalent computational model



а) по оси X / a) X-axis



б) по оси Y / b) Y-axis



в) по оси Z / c) Z-axis

— 0.01 — 0.05 — 0.113

Рисунок 4 – Перемещения верха колонн каркаса при сейсмическом воздействии при разном уровне демпфирования в системе

Figure 4 – Displacement of the top of the frame columns under seismic action at different levels of damping in the system

Таблица 3 – Уменьшение перемещений верха каркаса в зависимости от демпфирования

Table 3 – Reduction of movements of the top of the frame depending on damping

Направление	Снижение величины перемещения, %		
	$\xi = 0.01 \rightarrow \xi = 0.05$	$\xi = 0.05 \rightarrow \xi = 0.113$	$\xi = 0.01 \rightarrow \xi = 0.113$
X	33	29	51
Y	42	33	61
Z	53	10	57

В таблице 4 представлено численное сравнение величин перемещений и усилий в различных элементах каркаса для случаев, когда учитывается только конструкционное демпфирование в системе и когда дополнительно учтено эквивалентное демпфирование от трения. Полученные данные хорошо соотносятся с зарубежной нормативной практикой [20].

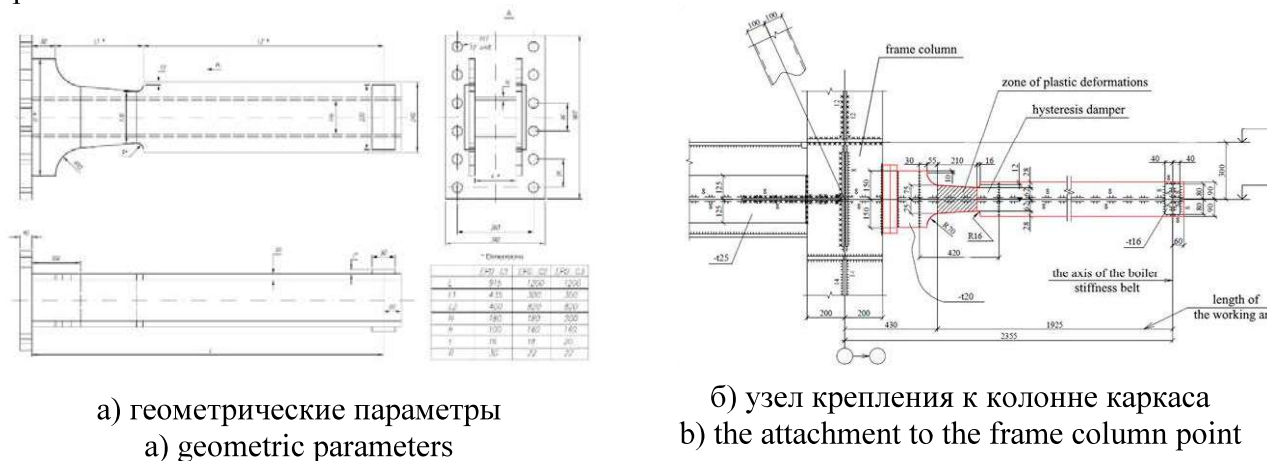
Таблица 4 – Сравнение перемещений и усилий в элементах каркаса

Table 4 – Comparison of displacements and forces in the frame elements

Параметр	Расчет: «без трения»	Расчет: «с трением»	Изменение, Δ, %
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 (припорная 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%

2. Учет упругопластических элементов антисейсмического раскрепления каркаса и котла

В качестве эффективного [21, 22] и при этом одного из самых простых и дешевых с точки зрения исполнения средства антисейсмического раскрепления котла могут применяться упругопластические балочные элементы (УПД) (рисунок 5). Экспериментально установлено, что они способны выдерживать до 10 циклов нагружения при проектной амплитуде перемещений и не менее 40 циклов при 50% от проектной амплитуды. Наиболее эффективными с точки зрения противодействия малоциклового усталости являются элементы коробчатого поперечного сечения.



а) геометрические параметры
 a) geometric parameters

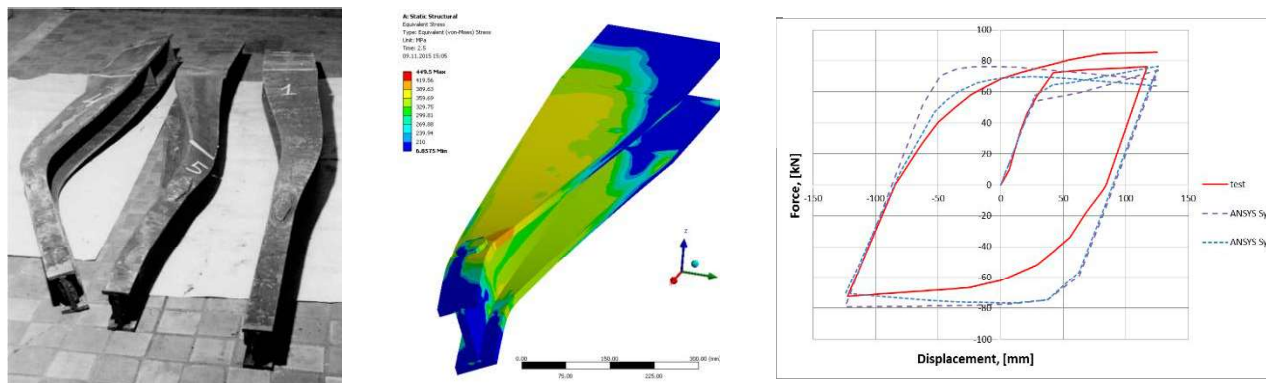
б) узел крепления к колонне каркаса
 b) the attachment to the frame column point

Рисунок 5 – Упругопластический элемент антисейсмического раскрепления

Figure 5 – Hysteresis element of antiseismic mounting

УПД крепятся к элементам каркаса и при необходимости могут быть достаточно просто заменены на новые (например, после прохождения сейсмического воздействия и накопления деформаций). Геометрические параметры УПД определяются расстоянием между каркасом и котлом, сечениями элементов каркаса, к которым он крепится, величинами проектных сейсмических нагрузок.

На основании экспериментальных исследований, проведенных в ЦНИИПСК в 1980 – 1990 гг., специалистами ООО «ЦВС» верифицирована методика проектирования УПД с требуемыми геометрическими параметрами в программном комплексе ANSYS, что позволяет разрабатывать индивидуальные конструктивные решения элементов антисейсмического раскрепления для каждого проекта (рисунок 6) [13].



а) экспериментальные образцы после испытаний
 a) experimental samples after testing

б) КЭ-моделирование испытаний
 b) FE-simulation of tests

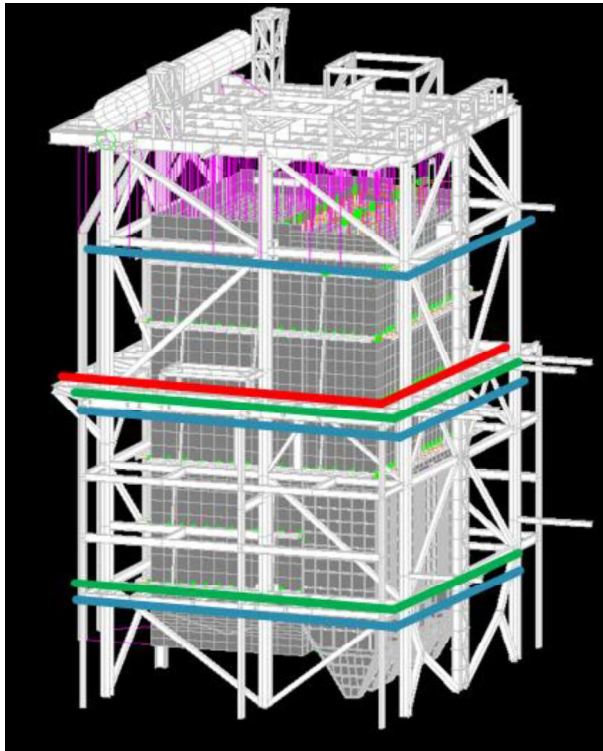
в) сравнение результатов эксперимента и КЭ-анализа
 c) comparison of results of experiment and FE-analysis

Рисунок 6 – Верификация моделирования УПД в программе ANSYS

Figure 6 – Verification of hysteresis element modeling in ANSYS

Численное моделирование УПД в программном комплексе ANSYS позволяет определить характеристики упругой и пластической работы элемента антисейсмического раскрепления, величины жесткости и демпфирования, которые в дальнейшем используются при анализе пространственных моделей системы «каркас–котел». В программном комплексе SCAD Office УПД моделируются упрощенно в виде стержневых элементов типа 410 с учетом физически нелинейной работы и вводятся между элементами каркаса и котла.

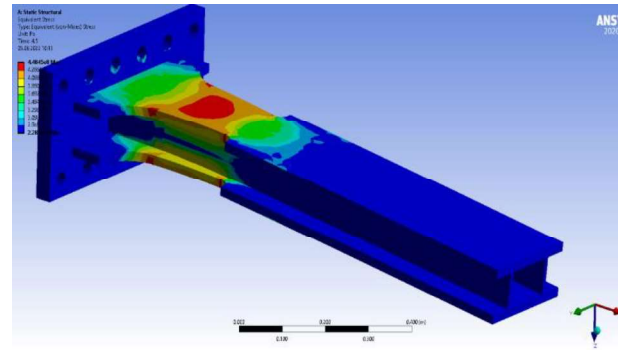
Для системы «каркас–котел» (рисунок 7), в которой допускаются относительные перемещения котла не более 150 мм, в программном комплексе SCAD Office проведена серия расчетов на сейсмические воздействия $PGA = 0.1$ g (7 баллов), 0.2 g (8 баллов), 0.4 g (9 баллов) с учетом элементов антисейсмического раскрепления (рисунок 8), устанавливаемых на разных уровнях по высоте каркаса, которые показывают (рисунок 9), что введение УПД в систему, корректировка их количества и мест положения позволяет получить оптимальный уровень перемещений, не допускающий возникновения аварийных ситуаций, т.е. обеспечивающий сейсмостойкость объекта.



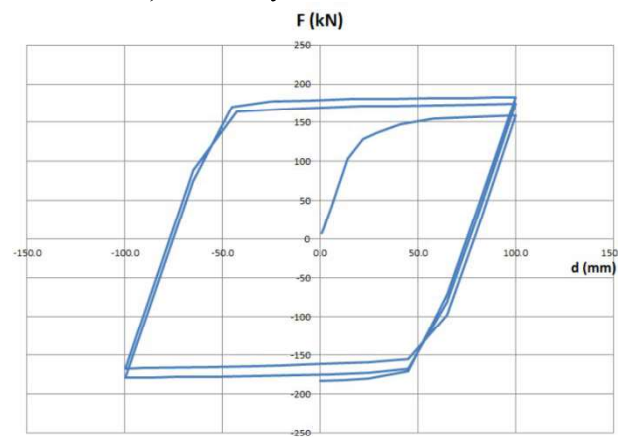
- – уровень раскрепления $PGA_1 = 0.1 \text{ g}$
- – уровень раскрепления $PGA_2 = 0.2 \text{ g}$
- – уровень раскрепления $PGA_3 = 0.4 \text{ g}$

Рисунок 7 – Расчетная модель в *SCAD Office*

Figure 7 – FE-model in SCAD Office



- а) КЭ-анализ, 3D-модель
- а) FE-analysis, 3D-model



- б) характеристика «сила-деформация»
- b) force-deformation characteristic

Рисунок 8 – УПД с рабочими перемещениями 150 мм

Figure 8 – Hysteresis element for movements of 150 mm

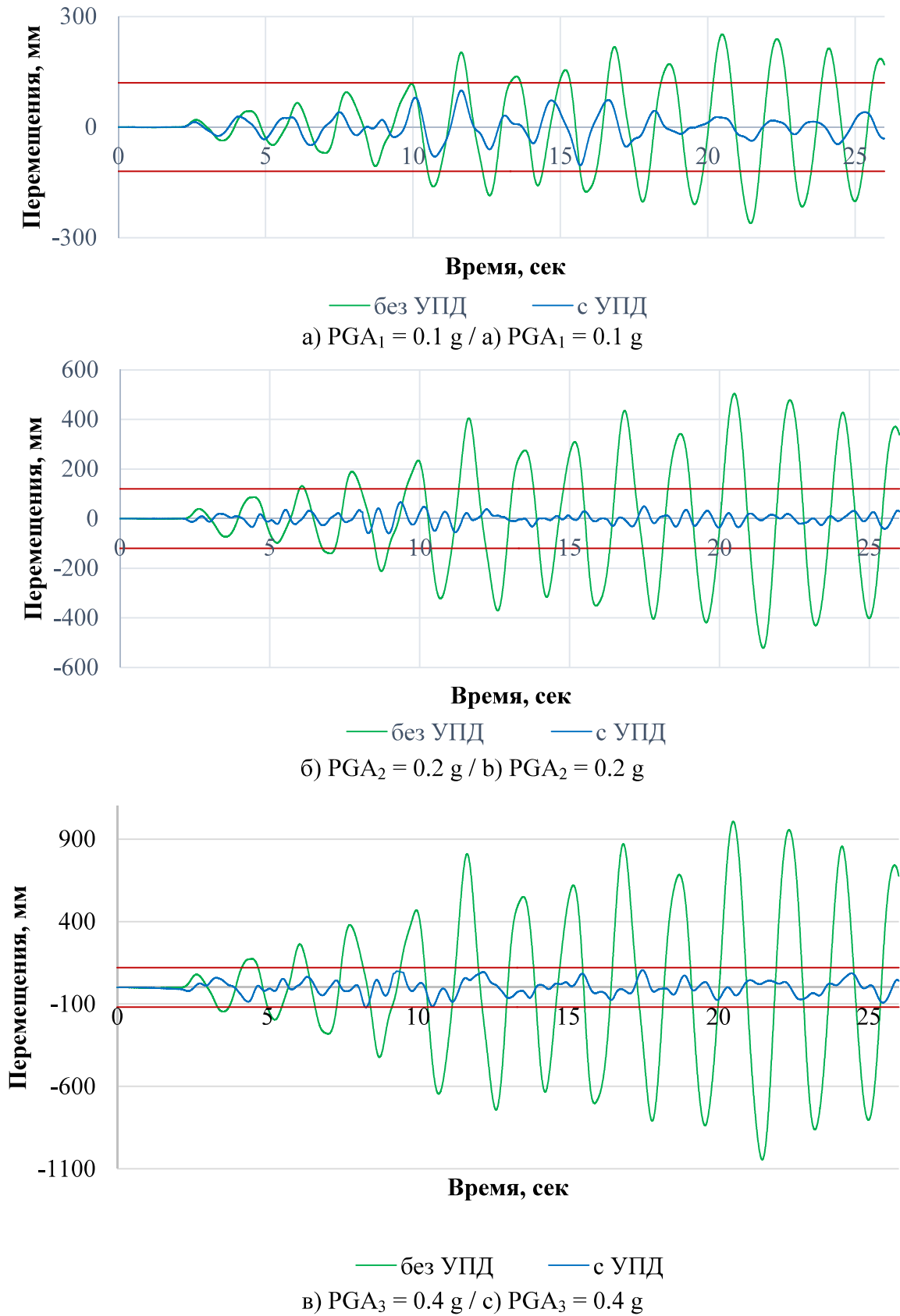


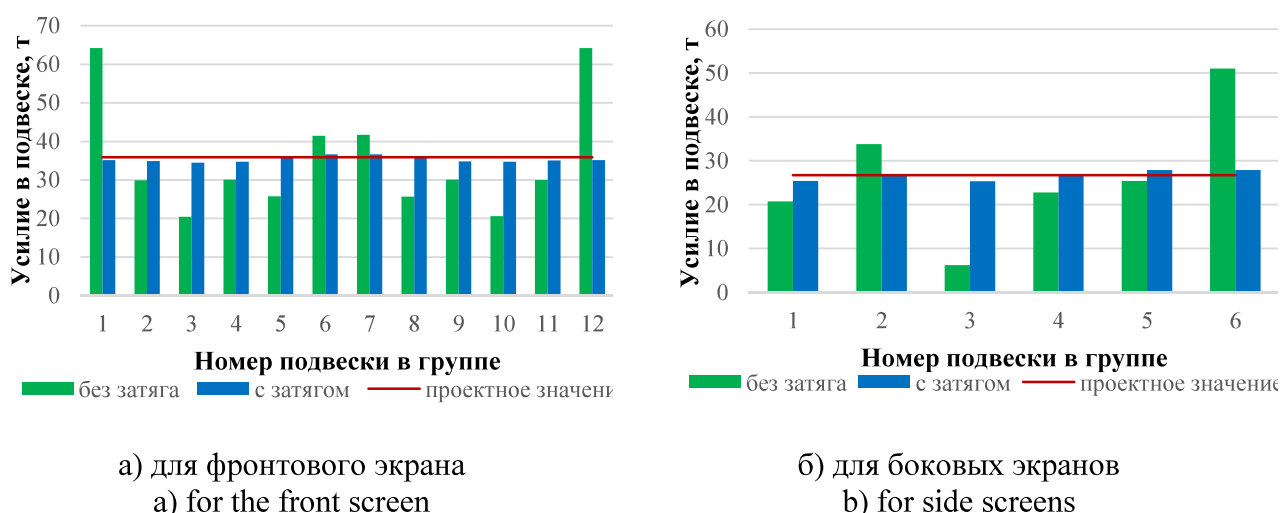
Рисунок 9 – Сравнение перемещений котла при разном уровне сейсмического воздействия

Figure 9 – Boiler movement comparison at different levels of seismic impact

3. КЭ-анализ работоспособности подвесной системы котла в условиях сейсмического воздействия

Сохранение работоспособности подвесной системы парового котла во время сейсмического воздействия является одним из важнейших параметров общей устойчивости системы «каркас-котел».

Как правило, ввиду значительной податливости конструкций перекрытия подвесная система котла без специальных монтажных мероприятий имеет неравномерную загрузку: крайние подвески фронтальных и боковых экранов могут перегружаться до 2 раз от проектных значений, подвески боковых экранов могут быть разгружены в 2...4 раза от проектных значений. В случаях, когда проектной организацией предполагается выравнивание нагрузок в подвесках («затяг»), данная операция должна быть корректно смоделирована при разработке расчетной модели. В программе *SCAD Office* это может быть осуществлено путем введения температурных нагрузок по аналогии с моделированием преднапряжения в арматуре железобетонных конструкций, при этом получаемые усилия отличаются от проектных не более чем на 2...5% (рисунок 10).



а) для фронтального экрана
 а) for the front screen

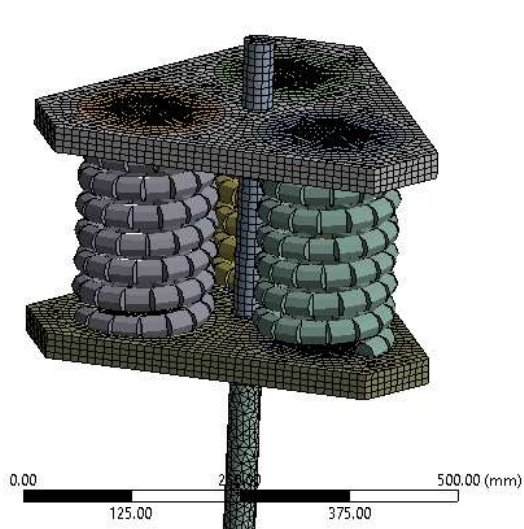
б) для боковых экранов
 б) for side screens

Рисунок 10 – Распределение усилий в подвесках котла

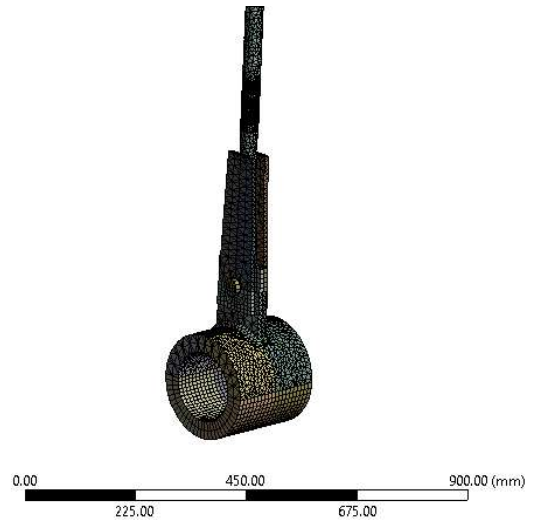
Figure 10 – Distribution of forces in boiler suspensions

Учитывая тот факт, что в программах строительного проектирования детализированное задание элементов подвесной системы невозможно, их проверка должна производиться посредством уточненного КЭ-анализа (рисунок 11). Применение расчетных зависимостей РД 10-249-98 [7] обеспечивает консервативный результат, поскольку они ориентированы на широкий круг объектов (с различными длинами тяг, типами пружин, вариантами соединения тяг с пружинными блоками и коллекторами и т.д.).

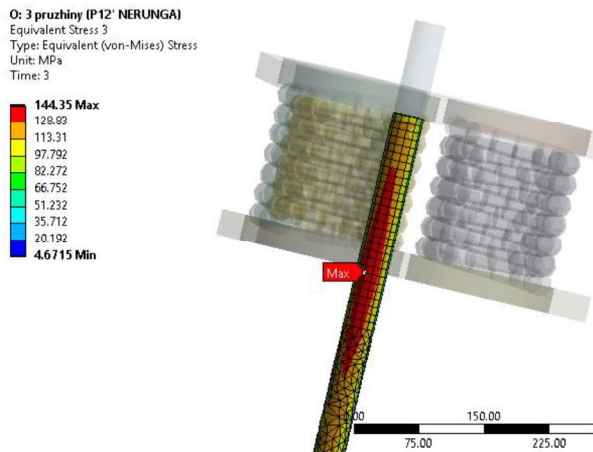
В таблице 5 представлено сравнение величин изгибных напряжений в подвесках, имеющих различные диаметры тяг (d_a), типы и количество пружин, максимальные нагрузки (F_{sum}) и перемещения (X, Y) концов тяг, полученные по результатам КЭ-анализа ($\sigma_{z1, КЭ}$) и расчета с учетом формул ($\sigma_{z1, РД}$) [7]. В ряде случаев уточненный анализ показывает существенно более низкий уровень напряжений (на величину до 50...60%).



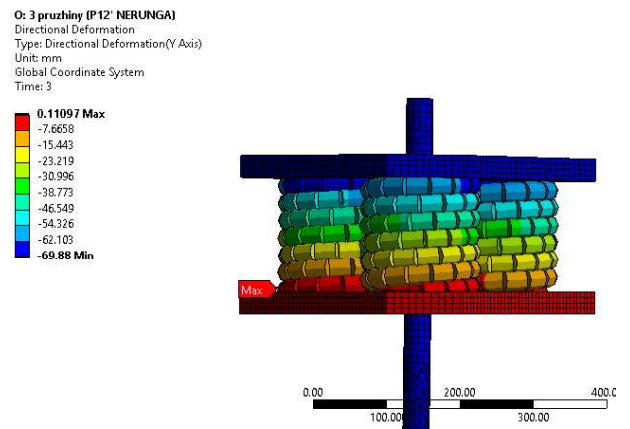
а) пружинный блок подвески
 a) spring suspension unit



б) крепление тяги подвески к коллектору
 экрана
 b) suspension rod attachment to the screen
 collector



в) изгибные напряжения в тяге
 c) bending stresses in traction



г) деформации пружинного блока
 d) spring block deformations

Рисунок 11 – КЭ-анализ подвески

Figure 11 – FE-analysis of suspension

Таблица 5 – Сравнение величин изгибных напряжений в подвесках, полученных по нормативным зависимостям и по данным КЭ-расчета

Table 5 – Comparison of the values of bending stresses in suspensions obtained according to normative dependencies and according to the FE-data

№	d_a , мм	l , мм	Пружины	F_{sum} , кН	X , мм	Y , мм	$\sigma_{z1,PD}$, МПа	$\sigma_{z1,KE}$, МПа	$\Delta = \sigma_{z1,KE} / \sigma_{z1,PD}$
1	60	4800	10 тарельчатых	160.99	56	136	417.32	238.29	0.571
2	60	4800	16 тарельчатых	293.51	51	25	488.88	208.03	0.426
3	60	7500	3 винтовых	116.65	141	141	119.03	90.88	0.764
4	80	3900	16 тарельчатых	7.92	98	136	259.59	192.12	0.740
5	80	9950	20 тарельчатых	615.44	141	141	188.6	84.33	0.447
6	24	5120	1 винтовая	223.33	97	134	563.80	228.52	0.405
7	36	3720	1 винтовая	31.34	97	122	310.17	273.34	0.881
8	36	7500	3 винтовых	205.26	141	141	187.23	70.63	0.377

Выводы.

1. Оценка сейсмостойкости каркасов подвесных котлов предполагает рассмотрение системы «каркас–котел» и учет целого ряда технологических требований наряду с требованиями прочности и устойчивости элементов металлоконструкций по СП 16.13330.

2. При оценке сейсмостойкости каркасов подвесных котлов принимается более высокий уровень демпфирования, чем рекомендуемый СП 14.13330 для стальных конструкций.

3. Недопустимо игнорировать влияние сухого трения в контактах между элементами системы «каркас–котел». Эквивалентное демпфирование от сил сухого трения может быть сопоставимым по величине с конструкционным демпфированием, а, соответственно, оказывает существенный вклад в динамическую реакцию.

4. Применение упругопластических элементов антисейсмического раскрепления (УПД) котлов позволяет эффективно регулировать динамическую реакцию системы «каркас–котел»; УПД с требуемой формой и характеристиками могут быть запроектированы с применением КЭ-анализа.

5. Требуется разработка инженерных методов учета технологических операций, например, выравнивания уровня нагрузок в группах подвесок котлов, для проведения КЭ-расчетов. Отсутствие учета подобных требований может приводить к перегрузке или разгрузке отдельных элементов каркаса, как следствие, некорректным результатам оценки НДС.

6. Выравнивание усилий в подвесках может быть реализовано посредством введения температурных нагрузок, если процедура «затяга» не реализована в расчетной программе.

7. Требования руководящих документов котлонадзора предлагают консервативные методы оценки элементов подвесной системы котла, которые могут быть уточнены путем КЭ-анализа.

Список литературы

1. Aida K., Morikawa S., Shimono M., Kato M., Morishita K., Amano T. Elasto-plastic finite element analysis of long-lived seismic ties for thermal power boiler structure. Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. PVP2017-65665. [<https://doi.org/10.1115/PVP2017-65665>]

2. Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Ghadim H.B., Hanif M.U. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation. Archives of Computational Methods in Engineering. March 2019. [<https://doi.org/10.1007/s11831-019-09329-9>]

3. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва: Стандартинформ. 2018.
4. ГОСТ 33963-2016 Котлы стационарные. Расчеты на сейсмическое и ветровое воздействия. Москва: Стандартинформ. 2017.
5. РТМ 108.031.09-83 Каркасы стальные паровых стационарных котлов. Нормы расчета (с Изменением N 1). НПО ЦКТИ. 1984.
6. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Стандартинформ. 2017.
7. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. Москва: ЗАО «НТЦИППБ». 2010. 344 с.
8. Ferri A. Friction Damping and Isolation Systems. ASME. J. Vib. Acoust. June 1995. 117(B). 196–206. [<https://doi.org/10.1115/1.2838663>]
9. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2017. 77 с.
10. ASCE 4-2016 Seismic Analysis Of Safety-Related Nuclear Structures.
11. Петров В.А., Цейтлин Б.В., Скворцова А.Е. Расчетная оценка сейсмостойкости основных сооружений Абаканской ТЭЦ // *Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева*. 2002. Т. 241. С. 18–27.
12. Расчет сейсмостойкости энергетического оборудования: сборник научных трудов / под ред. Б.В. Зверькова. Ленинград: Редакционно-издательский отдел НПО ЦКТИ. 1984. 123 с.
13. Анущенко А.М., Кульцеп А.В., Щукин А.Ю. Инженерный подход к оценке сейсмостойкости систем «каркас–котел» с применением пассивной сейсмозащиты при контрольном землетрясении // *Приволжский научный журнал*. 2023. № 1. С. 21–27.
14. Nazal J., Mora A. Seismic Behaviour of Guided Supports of Steam Generator Boilers and Design Using Energy Dissipators. The 17th World Conference on Earthquake Engineering.
15. Jangid R. Base Isolation for Seismic Retrofitting of Structures. 10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:4(175). Practice Periodical on Structural Design and Construction.
16. Subramanian K.V. Evolution of seismic design of structures, systems and components of nuclear power plants. *Journal of Earthquake Technology*. Paper no. 512, vol. 47, no. 2–4, June-Dec. 2010, pp. 87–108.
17. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ. 2019.
18. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле // Перевод с английского канд. физ.-мат. наук Л. Г. Корнейчука, под редакцией чл.-корр. АН СССР Э.И. Григолюка. Москва: Машиностроение. 1985. 472 с.
19. ГОСТ Р 57364-2016 / EN 15129:2010 Устройства антисейсмические. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ. 2017.
20. Nawrotzki P. Earthquake protection strategies for power plant equipment. Proceedings of the ASME 2009 Power Conference POWER. 2009-81161.
21. Hamidreza M. Earthquake-resistant with hysteretic dampers. *International Journal of Applied Research*. 2017. 3(1). 526–532.
22. Constantinou M.C., Soong T.T., Dargush G.F. Passive Energy Dissipation Systems for structural design and retrofit. Multidisciplinary Centre for Earthquake Engineering Research. USA. 1998, p. 299.

References

1. Aida K., Morikawa S., Shimono M., Kato M., Morishita K., Amano T. Elasto-plastic finite element analysis of long-lived seismic ties for thermal power boiler structure. Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. PVP2017-65665. [<https://doi.org/10.1115/PVP2017-65665>]

2. Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Ghadim H.B., Hanif M.U. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation. Archives of Computational Methods in Engineering. March 2019. [<https://doi.org/10.1007/s11831-019-09329-9>]
3. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Updated edition SNIIP II-7-81*. Moscow: Standartinform. 2018. [In Russian]
4. GOST 33963-2016 Stationary Boilers. Calculations for seismic and wind impacts. Moscow: Standartinform. 2017. [In Russian]
5. RTM 108.031.09-83 Steel frames of stationary steam boilers. Calculation norms (with Change N 1). NPO CKTI. 1984. [In Russian]
6. SP 20.13330.2016 Loads and impacts. Updated version of SNIIP 2.01.07-85*. Moscow: Standartinform. 2017. [In Russian]
7. RD 10-249-98 Calculation standards for the strength of stationary boilers and steam and hot water pipelines. Moscow: CJSC "NTCIPPB". 2010. 344 c. [In Russian]
8. Ferri A. Friction Damping and Isolation Systems. ASME. J. Vib. Acoust. June 1995. 117(B). 196–206. [<https://doi.org/10.1115/1.2838663>]
9. NP-031-01 Design standards for earthquake-resistant nuclear power plants. Moscow: FBU "NTC YaRB". 2017. 77 c. [In Russian]
10. ASCE 4-2016 Seismic Analysis Of Safety-Related Nuclear Structures.
11. Petrov V.A., Tseitlin B.V., Skvortsova A.E. Estimated seismic resistance of the main structures of the Abakan CHP // *Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 2002. Vol. 241. pp. 18–27.
12. Calculation of seismic resistance of power equipment: collection of scientific papers / edited by B.V. Zverkov. Leningrad: Editorial and publishing department of NPO CKTI. 1984. 123 p.
13. Anushchenko A.M., Kultsep A.V., Shchukin A.Yu. An engineering approach to assessing the seismic resistance of "frame-boiler" systems using passive seismic protection during a control earthquake. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2023, no. 1, pp. 21–27.
14. Nazal J., Mora A. Seismic Behaviour of Guided Supports of Steam Generator Boilers and Design Using Energy Dissipators. The 17th World Conference on Earthquake Engineering.
15. Jangid R. Base Isolation for Seismic Retrofitting of Structures. 10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:4(175). Practice Periodical on Structural Design and Construction.
16. Subramanian K.V. Evolution of seismic design of structures, systems and components of nuclear power plants. *Journal of Earthquake Technology*. Paper no. 512, vol. 47, no. 2–4, June-Dec. 2010, pp. 87–108.
17. GOST 27751-2014 Reliability of building structures and foundations. The main provisions. Moscow: Standartinform. 2019.
18. Timoshenko S.P., Yang D.H., Weaver U. Fluctuations in engineering // Translated from English by Candidate of Physical and Mathematical Sciences L. G. Korneychuk, edited by chl.-corr. Academy of Sciences of the USSR E.I. Grigolyuk. Moscow: Mechanical Engineering. 1985. 472 p.
19. GOST R 57364-2016 / EN 15129:2010 Antiseismic devices. Design rules. Moscow: Standartinform. 2017.
20. Nawrotzki P. Earthquake protection strategies for power plant equipment. Proceedings of the ASME 2009 Power Conference POWER. 2009-81161.
21. Hamidreza M. Earthquake-resistant with hysteretic dampers. *International Journal of Applied Research*. 2017. 3(1). 526–532.
22. Constantinou M.C., Soong T.T., Dargush G.F. Passive Energy Dissipation Systems for structural design and retrofit. Multidisciplinary Centre for Earthquake Engineering Research. USA. 1998, p. 299.

Информация об авторе/ Information about author

Анушенко Александр Михайлович, ведущий инженер, Общество с ограниченной ответственностью «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ» (ООО «ЦВС»). 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 9 e-mail: AAnushchenko@cvs.spb.su

Aleksandr M. Anushchenko, Lead Engineer, LLC “CVS”
195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 9
e-mail: AAnushchenko@cvs.spb.su