



13. Gelfond A. L. Arkhitekturnoe proektirovanie obschestvennykh zdaniy i sooruzheniy [Architectural design of public buildings and structures] : ucheb. posobie dlya studentov vuzov po spetsialnosti "Arkhitektura" napravleniya podgotovki "Arkhitektura" – Moscow: Arkhitektura-C, 2006, 280 p., il. – ISBN 5-9647-0099-3.

14. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and effects] : svod pravil : utverzhd. Prikazom Ministroya Rossii ot 03.12.2016 N 891/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.1.07-85* : data vved. 4 iyunya 2017 g. : [red. ot 30.05.2022]. – URL: <http://www.consultant.ru>.

© С. В. Суханов, А. Н. Шипунов, И. В. Шкода, Л. Ю. Тягунова, В. В. Кувалов, П. А. Хазов, 2023

Получено: 02.12.2022 г.

УДК [621.18:624.014]+550.34

А. М. АНУЩЕНКО, ст. инженер; А. В. КУЛЬЦЕП, Doctor of engineering (PhD); А. Ю. ЩУКИН, зам. директора

ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СИСТЕМ «КАРКАС – КОТЕЛ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ПАССИВНОЙ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ПРИ КОНТРОЛЬНОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ»

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

Ключевые слова: система «каркас – котел», сейсмическая нагрузка, физическая нелинейность, упругопластический демпфер, контрольное землетрясение.

Оценка сейсмостойкости сложных конструктивных систем «каркас – котел» с применением стандартных положений строительных сводов правил невозможна. В настоящей статье на примере расчета стального каркаса для парового котла подвесного типа на контрольное землетрясение уровня 7 баллов по шкале MSK-64 рассматривается инженерный подход к решению данной задачи посредством рассмотрения устойчивости отдельных подсистем, для оценки которых, наряду со строительными нормами, используются руководящие технические материалы и документы по проектированию котлов.

При обеспечении безопасной эксплуатации энергетических объектов в условиях сейсмических воздействий необходимо добиваться безаварийной работы технологического оборудования, которое может быть связано со строительными конструкциями. В качестве примера такого оборудования можно привести паровые котлы ТЭС и ГРЭС, которые монтируются к перекрытиям стальных каркасов на специальные подвески (блоки тарельчатых или винтовых пружин и тяги). В данном случае необходимо рассматривать сложную механическую систему «каркас – котел», к оценке сейсмостойкости которой не могут быть применены только стандартные положения строительных сводов правил [1, 2, 3]. При этом нормы, регулирующие расчеты самих котельных агрегатов на сейсмические воздействия [4, 5, 6], не отражают вопросы оценки устойчивости строительных конструкций.

В целях обеспечения сейсмостойкости системы «каркас – котел», а также снижения амплитуды колебаний котлоагрегата на практике нашли широкое применение наиболее простые с точки зрения конструктивного исполнения средства пас-

сивной защиты – упруго-пластические демпферы (УПД) консольного типа, которые жестко монтируются к элементам каркаса и связываются с поясами жесткости экранов котла таким образом, чтобы обеспечивалась возможность температурных расширений элементов котла [7, 8].

Свод правил [1] (п. 5.2.2) устанавливает для всех рассчитываемых конструктивных систем требование обеспечения общей устойчивости при контрольном землетрясении, которое в соответствии со статьей 16 федерального закона [9] может быть определено как предельное состояние, характеризующееся потерей устойчивости формы или потерей устойчивости положения.

В соответствии с [9] расчеты пространственных систем должны производиться с обязательным учетом фактической работы конструкций, что в должной мере может быть обеспечено только посредством применения верифицированных программных комплексов.

Один из реализованных в расчетных программных комплексах подходов к оценке общей устойчивости основан на классическом подходе Л. Эйлера для строго прямолинейных идеально упругих стержней в предположении о том, что приложенные к системе внешние нагрузки и внутренние усилия растут пропорционально одному параметру (λ). Значение λ , при котором матрица жесткости системы $\Delta(\lambda)$ становится отрицательно определенной, является критическим для рассматриваемой системы и принимается в качестве коэффициента запаса устойчивости [10].

Однако системы «каркас – котел» с применением УПД являются сложными, отличными от упругих прямолинейных стержней. Они включают в себя следующие элементы: каркас котла, в элементах которого не предполагается развитие неупругих деформаций; гибкую подвесную систему котла; котел, состоящий из ряда подсистем – газоплотные экраны, ширмовые пароперегреватели, экономайзеры, трубопроводы, взаимосвязанные между собой; упругопластические демпферы. В связи с этим классический метод Л. Эйлера не может быть применен для оценки общей устойчивости.

В соответствии с п. 4.1.9 свода правил [3] при отсутствии точных теоретических методов расчета по предельным состояниям допускается применение приближенных методов и упрощенных расчетных схем, основанных на разделении единых пространственных систем на отдельные элементы с учетом особенностей их взаимодействия между собой.

С учетом опыта проектирования и эксплуатации систем «каркас – котел» оценка сейсмостойкости может быть произведена по соответствию отдельных элементов и подсистем следующим критериям:

- обеспечение общей устойчивости каркаса котла;
- не превышение допустимых величин деформаций и перемещений элементов каркаса (колонн и балок перекрытий);
- не превышение допустимых горизонтальных перемещений элементов котла (должно обеспечиваться отсутствие контакта между котлом и каркасом при сейсмических колебаниях с учетом дополнительных тепловых деформаций);
- не превышение допустимых величин усилий в местах крепления УПД к поясам жесткости экранов котла;
- обеспечение прочности и устойчивости элементов подвесной системы котла.

В настоящей статье приводятся результаты оценки сейсмостойкости запроектированного на расчетное землетрясение уровня 7 баллов по шкале MSK-64 кар-



каса котла для парового котла подвесного типа.

Оценка сейсмостойкости системы «каркас – котел» (расчет на КЗ) осуществлена по результатам динамического физически нелинейного расчета в программном комплексе *SCAD Office* [10, 11]. Расчетная схема системы «каркас – котел», построенная по данным технической документации, представлена на рис. 1 цв. вклейки.

В расчетную схему введены физически нелинейные стержневые элементы, работа которых соответствует характеру работы УПД, запроектированному на рабочую нагрузку 150 кН (рис. 2 цв. вклейки).

Поскольку расчет осуществляется в физически нелинейной постановке, для точного воспроизведения работы УПД в условиях развития пластических деформаций сейсмическое воздействие задается синтезированными акселерограммами с учетом спектров, указанных в своде правил [1] на временном участке 26 с (рис. 3 цв. вклейки).

Результаты физически нелинейного динамического расчета, полученные в программе *SCAD Office*, использовались для дальнейших критериальных оценок сейсмостойкости отдельных подсистем котла.

Проверка соответствия характера работы УПД при заданном сейсмическом воздействии экспериментальным исследованиям

На рис. 2 цв. вклейки представлен график зависимости «деформации – усилия», построенный в соответствии с результатами экспериментальных исследований УПД на действие циклической нагрузки.

Характерный график изменения поперечных сил, возникающих в УПД при расчете на КЗ в программном комплексе *SCAD Office*, представлен на рис. 1а цв. вклейки.

График изменения нагрузки в зависимости от деформации УПД показан на рис. 1б цв. вклейки). Данный график отражает характер работы УПД, соответствующий экспериментальным исследованиям, что позволяет говорить о корректности получаемых результатов физически нелинейного расчета системы «каркас – котел».

Оценка общей устойчивости каркаса котла

Оценка общей устойчивости каркаса котла в соответствии с требованиями свода правил [2] как составной части системы «котел – каркас» произведена с использованием энергетического постпроцессора программного комплекса *SCAD Office*. Проверка роли отдельных подсистем расчетных схем производится путем подсчета суммарного значения энергии, накапливаемой в рассматриваемой части при ее деформировании. Части системы с суммарно положительной энергией деформации относятся к удерживающим, т. е. способствующим сохранению устойчивости системы.

На рис. 4 цв. вклейки представлены картины распределения энергии деформации в элементах каркаса котла с указанием суммарной величины энергии, свидетельствующие о сохранении общей устойчивости каркаса в условиях КЗ ($E > 0$).

**К СТАТЬЕ А. М. АНУЩЕНКО, А. В. КУЛЬЦЕПА, А. Ю. ЩУКИНА
«ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СИСТЕМ
«КАРКАС – КОТЕЛ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ПАССИВНОЙ
СЕЙСМОЗАЩИТЫ ПРИ КОНТРОЛЬНОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ»**

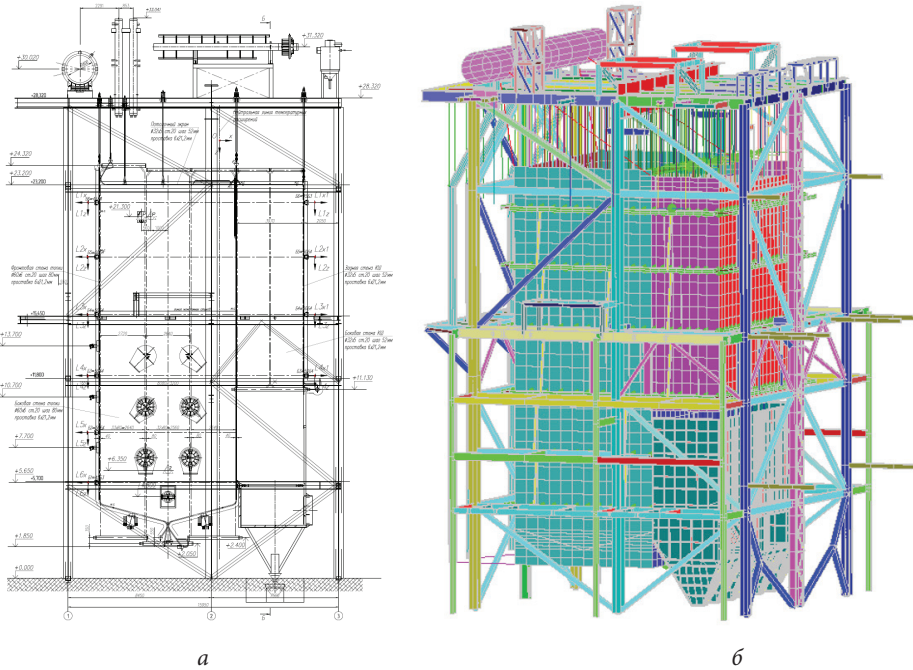


Рис. 1. Рассматриваемая система «каркас – котел»: *a* – установочный чертеж парового котла и каркаса; *б* – расчетная схема системы «каркас – котел» в *SCAD Office*

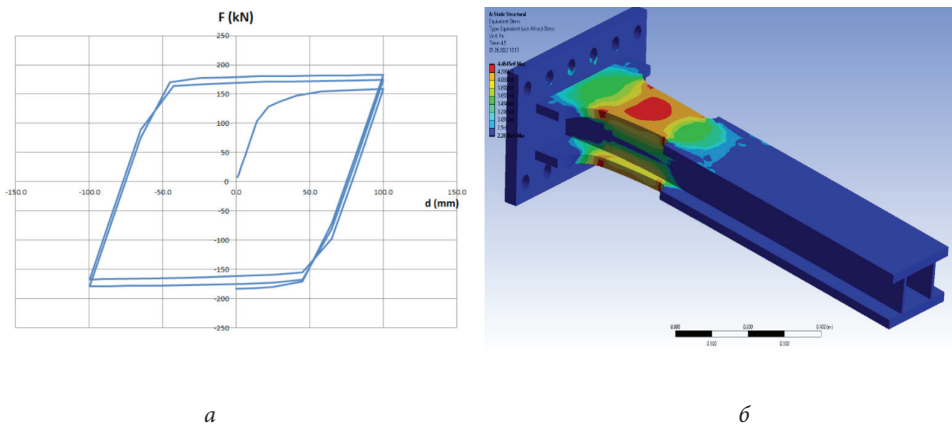


Рис. 2. Характер работы УПД консольного типа: *a* – график «усилия – перемещения»; *б* – распределение напряжений при циклической рабочей нагрузке 150 кН

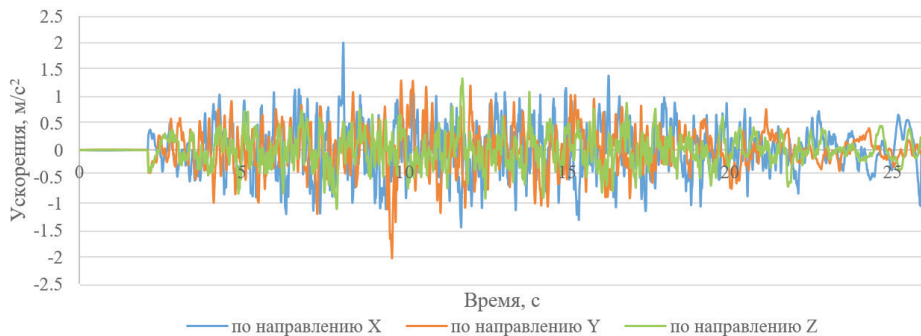


Рис. 3. Синтезированные акселерограммы

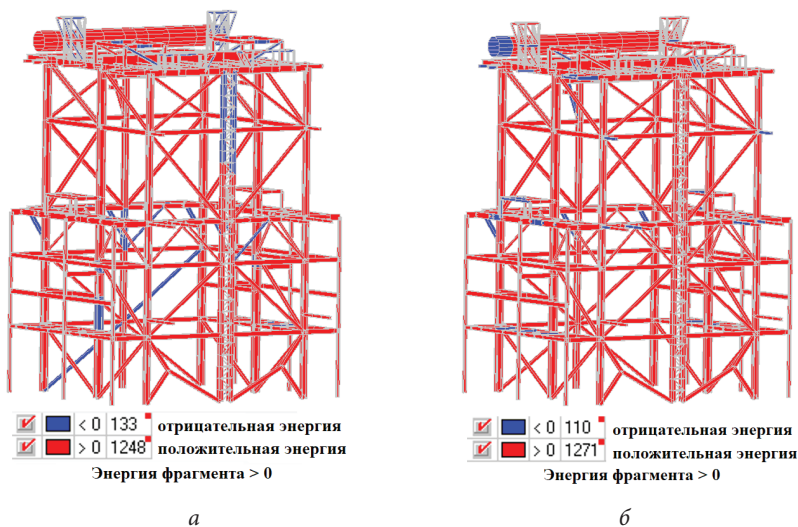


Рис. 4. Распределение энергии деформации в элементах каркаса котла: а – при «догружающем» действии сейсмической нагрузки; б – при «разгружающем» действии сейсмической нагрузки

R: Copy of P2 (gotovy)
 Equivalent Stress 3
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 3

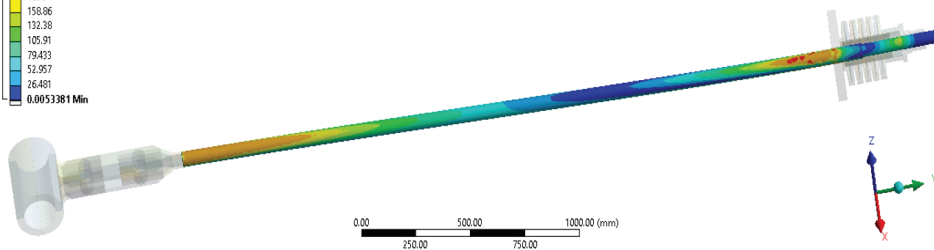
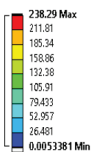
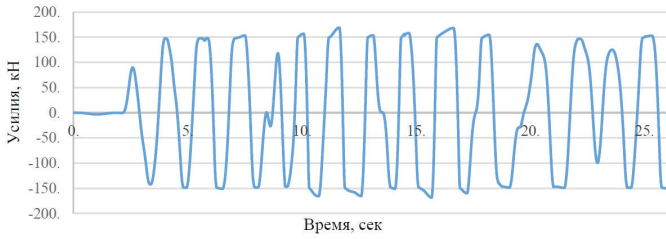
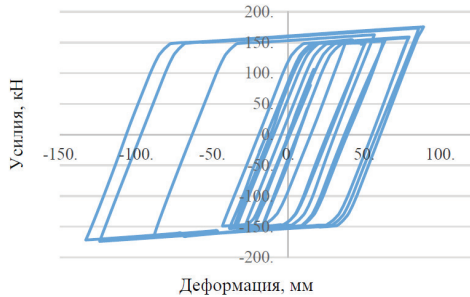


Рис. 5. Напряжения в наиболее нагруженной тяге подвески по результатам расчетов в ANSYS на основании данных о перемещениях и усилиях из SCAD Office



а



б

Изменение усилий в УПД: а – во времени; б – в зависимости от деформаций

Оценка перемещений элементов системы «каркас – котел»

РТМ [6] устанавливает, что перемещения каркаса котла от расчетных нагрузок с учетом сеймики не должны превышать: для колонн на высоте H от уровня обреза фундамента – $H/400$; для главных (хребтовых) балок при двухопорном опирании – $L/400$ (для вертикального и горизонтального направлений). Оценка соответствия допустимым величинам максимальных относительных горизонтальных перемещений верхних точек колонн каркаса, на которые опирается потолочное перекрытие, полученных по результатам расчета в программном комплексе *SCAD Office*, представлена в табл. 1; для хребтовой балки оценка перемещений вертикальных и горизонтальных перемещений приведена в табл. 2.

Таблица 1

Максимальные относительные перемещения верхних точек колонн каркаса

Относительные перемещения верха, мм		Максимальное перемещение, мм	Отметка верха	Допустимое перемещение, мм
по оси X	по оси Y			
56.183	-13.297	57.74	+28.320	70.8

Таблица 2

Максимальные относительные перемещения хребтовой балки

Направление перемещений	Максимальное относительное перемещение, мм	Длина балки, мм	Допустимое перемещение, мм
Вертикальное	19.01	16 000	40
Горизонтальное	12.06	16 000	40



В соответствии с конструктивными особенностями крепления котла к каркасу его максимальные допустимые перемещения в горизонтальных направлениях составляют 118 и 365 мм. Оценка соответствия перемещений производится по величинам относительного смещения консольных концов УПД, представленным в табл. 3.

Таблица 3

Максимальные (по модулю) усилия и деформации в УПД

Номер УПД	Деформация, мм	Усилие в УПД, кН	Допустимая деформация, мм
1	133.685	174.874	365
2	104.060	169.010	118
3	133.185	175.412	365
4	101.902	176.561	118

Оценка прочности элементов подвесной системы котла

Прочность элементов подвесной системы котла на действие КЗ определяется соответствием напряжений, возникающих в их элементах (тяги, резьба, валики, щеки), допустимым величинам, а также допустимой деформацией пружинных блоков. Виды нормируемых напряжений указаны в [4, 5]. Поскольку формулы, приведенные в [4, 5], обеспечивают излишнюю консервативность расчетов, проверка максимально нагруженных подвесок котла (по данным из программного комплекса *SCAD Office* о перемещениях и растягивающих усилиях в тягах) производится путем уточненного численного моделирования подвесок в программном комплексе *ANSYS* (рис. 5 цв. вклейки). Например, суммарные приведенные напряжения в тяге наиболее нагруженной подвески составили 238.29 МПа (допустимый параметр – 292.6 МПа); коэффициент использования – 0.814, что говорит о соответствии ее критерию прочности.

Выводы:

1. В настоящей статье представлен инженерный метод оценки сейсмостойкости сложной механической системы «каркас – котел». Все предложенные критериальные оценки могут быть выполнены по результатам физически нелинейного динамического расчета в программном комплексе *SCAD Office* с применением положений как традиционных строительных норм и правил, так и руководящих технических документов на проектирование котлоагрегатов.

2. В статье приводятся результаты расчета системы «каркас – котел» на КЗ, которые позволяют сделать вывод об обеспечении общей устойчивости всей системы вследствие обеспечения устойчивости ее отдельных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах : актуализированная редакция СНиП II-7-81* : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 мая 2018 г. № 309/пр : дата введения : 2018-11-25. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571?ysclid=lc5xemxzac941564753>. – Текст : электронный.
2. СП 16.13330.2017. Металлические конструкции : актуализированная редакция СНиП II-23-81* : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : дата введения 2017-08-28. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588?ysclid=lc5xq86xe3814081166>. – Текст : электронный.



3. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования : утверждено Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 31 мая 2017 г. № 828/пр : дата введения 2017-12-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088764?ysclid=lc5z2evpzo339827684>. – Текст : электронный.
4. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды : утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 25.08.1998 № 50 : дата введения 2001-09-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200021653?ysclid=lc5z4ev7lp935867200>. – Текст : электронный.
5. РТМ 108.031.114-85. Котлы паровые стационарные. Нормы расчета на прочность при сейсмическом воздействии.
6. РТМ 108.031.09-83. Каркасы стальные паровых стационарных котлов. Нормы расчета на прочность : утверждено и введено в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 18.02.83 N ВВ-002/1333 : дата введения 1983-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200062838?ysclid=lc61avau45436838516>. – Текст : электронный.
7. Research and Development of Viscous Fluid Dampers for Improvement of Seismic Resistance of Thermal Power Plants: Part 2 – Evaluation of Lifetime / Kiyoshi Aida, Keisuke Minagawa, Go Tanaka, Satoshi Fujita // ASME 2017 : Fluid Engineering Division Summer Meeting, (Hawaii, USA). – Hawaii, 2017. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/189146624.pdf>. – Текст : электронный.
8. Разработка и экспериментальная отработка энергопоглотителей для сейсмостойких котлов : договор № 924-88 от 01.12.88 : отчет № 246110/0-14960 / НПО ЦКТИ, 1991.
9. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ : [Принят Государственной Думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации от 25 декабря 2009 года] : последняя редакция. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/?ysclid=lc635io0a467404727. – Текст : электронный.
10. Карпиловский, В. С. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD ++ / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко [и др.]. – Москва : Издательство СКАД СОФТ, 2019. – 979 с.
11. Хазов, П. А. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс: монография / П. А. Хазов, Д. А. Кожанов, А. М. Анущенко, А. А. Сатанов ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2022. – 96 с. – ISBN 978-5-528-00475-4.

ANUSCHENKO Aleksandr Mikhaylovich, senior engineer, KULTSEP Aleksandr Vladimirovich, Doctor of engineering (PhD), SCHUKIN Aleksandr Yurevich, deputy director

ENGINEERING APPROACH TO THE ASSESSMENT OF SEISMIC RESISTANCE OF THE "FRAME – BOILER" SYSTEMS USING ELEMENTS OF PASSIVE SEISMIC PROTECTION DURING A CONTROL EARTHQUAKE

JSC TsKTI-VIBROSEYSM

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

Key words: frame-boiler system, seismic load, physical nonlinearity, elastic-plastic damper, control earthquake.

It is impossible to assess seismic resistance of complex "frame-boiler" structural systems using standard building rules. By the example of calculating a steel frame for a suspended type steam boiler for a control 7-point earthquake on the MSK-64 scale, this article considers an engineering approach to solve the problem by assessing stability of individual subsystems using not only the building codes but also technical materials and design documents of boilers.



REFERENCES

1. SP 14.13330.2018. Stroitelstvo v seismicheskikh rayonakh [Construction in seismic areas]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-7-81*: utverzhdyon prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khozyaystva RF ot 24 maya 2018 g. № 309/pr : data vved. : 2018-11-25. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571?ysclid=lc5xemxzac941564753>.
2. SP 16.13330.2017. Metallicheskie konstruksii [Metal structures]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-23-81*: utverzhdyon prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khozyaystva RF ot 27 fevralya 2017 g. № 126/pr : data vved. : 2017-08-28. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588?ysclid=lc5xq86xe3814081166>.
3. SP 294.1325800.2017. Konstruksii stalnye. Pravila proektirovaniya [Steel structures. Design rules]: utverzhdyon prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khozyaystva RF ot 31 maya 2017 g. № 828/pr : data vved. : 2017-12-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088764?ysclid=lc5z2evpzo339827684>.
4. RD 10-249-98. Normy raschyota na prochnost statsionarnykh kotlov i truboprovodov para i goryachey vody [Norms for calculating the strength of stationary boilers and pipelines of steam and hot water]: utverzhd. postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii ot 25.08.1998 № 50 : data vved. 2001-09-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200021653?ysclid=lc5z4ev7lp935867200>.
5. RTM 108.031.114-85. Kotly parovye statsionarnye. Normy raschyota na prochnost pri seismicheskoy vozdeystvii [Stationary steam boilers. Norms of calculation for strength under seismic impact].
6. RTM 108.031.09-83. Karkasy stalnye parovykh statsionarnykh kotlov. Normy raschyota na prochnost [Frameworks of steel steam stationary boilers. Norms for calculating strength]: utverzhd. i vved. v deysvie ukazaniem Min-va energetich. mashinostroeniya ot 18.02.83 № BB-002/1333 : data vved. 1983-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200062838?ysclid=lc61avau45436838516>.
7. Kiyoshi Aida, Keisuke Minagawa, Go Tanaka, Satoshi Fujita. Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants. Part 2. Evaluation of lifetime. Proceedings of the ASME 2017 : Fluid Engineering Division Summer Meeting, (Hawaii, USA). – Hawaii, 2017. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/189146624.pdf>.
8. Razrabotka i eksperimentalnaya otrabotka energopoglotiteley dlya seymstoykikh kotlov [Development and experimental testing of energy absorbers for earthquake-resistant boilers]: dogovor № 924-88 ot 01.12.88, otchyot № 246110/0-14960, NPO TsKTI, 1991.
9. Tekhnicheskyy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [Technical regulation on the safety of buildings and structures]. Federalny zakon ot 30 dekabrya 2009 g. № 384-FZ. : Prinyat Gos. Dumoy 23 dekabrya 2009 g. : odobren Sovetom Federatsii ot 25 dekabrya 2009 g. : poslednyaya redaktsiya. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/?ysclid=lc635io0a467404727.
10. Karpilovsky V. S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A. A., [et al]. SCAD Office. Versiya 21. Vychislitelnyy kompleks SCAD ++ [SCAD Office. Version 21. Computer system SCAD ++]. – Moscow : Izdatelstvo SKAD SOFT, 2019. – 979 p.
11. Khazov P. A., Kozhanov D. A., Anuschenko A. M., Satanov A. A. Dinamika stroitelnykh konstruksiy pri ekstremalnykh prirodnykh vozdeystviyakh: kolebaniya, prochnost, resurs [Dynamics of building structures under extreme natural impacts: vibrations, strength, lifetime]: monografiya; Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2022. – 96 p. ISBN 978-5-528-00475-4.

© А. М. Анущенко, А. В. Кульцеп, А. Ю. Щукин, 2023

Получено: 29.10.2022 г.