



Research Article

Received: November 3, 2023

Accepted: December 4, 2023

Published: December 21, 2023

ISSN 2304-6295

# Seismic resilience frames of industrial buildings with energy absorbers

Belov, Vyacheslav Vasilievich<sup>1\*</sup>   
Verkhovskiy, Roman Dmitrievich<sup>1</sup>   
Nikolaev, Georgy Alekseevich<sup>1</sup>   
Mikheev, Stepan Anatolyevich<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; belovvv@mgsu.ru (B.V.V.); [roman.verhovskii@mail.ru](mailto:roman.verhovskii@mail.ru) (V.R.D.); nikolaev.georgy.al@gmail.com (N.G.A.); mikheevs.sea@gmail.com (M.S.A.)

Correspondence:\* email [roman.verhovskii@mail.ru](mailto:roman.verhovskii@mail.ru); contact phone [+79153373193](tel:+79153373193)

## Keywords:

Seismic resilience; Industrial buildings; Energy Absorbers; Survivability of a steel frame; Numerical analysis; Main building of a thermal power plant; Plastic deformations

## Abstract:

**The object of research** is the seismic resilience of industrial buildings with a frame design of the structural scheme. Increasing seismic resilience, especially for energy facilities, is promising. With the change in the regulatory and technical base of the Russian Federation, it is necessary to search and analyze new design options that would increase the survivability of the building while being economically justified. Therefore, this paper considers the use of methods for improving seismic resistance through elements for absorbing vibrational energy during the implementation of a special seismic effect, working elastically. **Method.** A detailed numerical analysis of the operation of the industrial building frame's structural system was carried out using the finite element method in modern software systems based on the example of a thermal power plant (TPP) with a gas turbine with a capacity of 170 MW in two versions with energy-absorbing structures of details and a "traditional" version. **Results.** As a result, the prospects for using energy absorption elements in frame-braced structures of the frame of the TPP building were substantiated. It has been established that such solutions make it possible to concentrate most of the residual deformations in themselves, thereby reducing the deformability of other structural elements, increasing the overall survivability of the frame, and reducing the volume of restoration during the implementation of seismic impact. A quantitative assessment was given of the change in the operation of the frame of a TPP with a 170 MW gas turbine equipped with energy absorbers during the implementation of a seismic impact.

## 1 Introduction

Территория Российской Федерации в целом характеризуется умеренной сейсмичностью, за исключением регионов Северного Кавказа, юга Сибири, Дальнего Востока и других, где интенсивность землетрясений может достигать 7–10 баллов по шкале MSK-64 [1]. Вместе с тем тренд государственного развития в начале 2020-х годов направлен непосредственно на указанные регионы [2]-[3], что, так или иначе связано с необходимостью строительства новых объектов, в том числе энергетических.

В частности, для тепловых электрических станций, характерно распределение до 50–70 % капиталовложений в одно здание на территории промышленной площадки – главный корпус, традиционным решением конструктивной схемы которого, является – каркасная рамно-связевая с рамами в поперечном направлении, которые соединены связями и распорками в продольном [4]-[5].

Belov, V.; Verkhovskiy, R.; Nikolaev, G.; Mikheev, S.

Seismic resilience frames of industrial buildings with energy absorbers;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10925. doi: 10.4123/CUBS.109.25



В свою очередь, проектирование зданий и сооружений в районах с высокой интенсивностью землетрясений ставит задачи поиска и рассмотрения новых, эффективных конструктивных решений, позволяющих повысить сейсмостойкость, а также минимизировать затраты и сроки при будущем восстановлении в случае реализации негативного события, за счет меньших повреждений и легко заменяемых элементов [6]. Одними из наиболее универсальных, простых и эффективных способов повышения сейсмостойкости являются энергопоглощающие элементы металлоконструкций каркаса, переходящие в упругопластическую стадию работы и за счёт развития пластических деформаций, поглощающие энергию [7].

Однако, нормативной документацией РФ применение указанных решений не регламентируется [1].

В научно-технической литературе рассматривается их применение к многоэтажным зданиям, где каркасы в обоих горизонтальных направлениях имеют рамы со связями [8]-[10], есть много исследований узловых решений в отдельности, в частности рамных узлов [11]-[12], связевых элементов [13]-[14], опорных частей колонн [15]. Можно отметить, что вопрос использования элементов энергопоглощения достаточно хорошо изучен, есть много вариаций таких элементов и примеров их применения в многоэтажных, в основном офисных зданиях.

При этом для одноэтажных промышленных зданий либо рассматриваются другие варианты сейсмозащиты, либо дополнительные мероприятия по увеличению сейсмостойкости не применяют [16]-[18]. То есть мало изучены конкретные примеры внедрения энергопоглощителей в рамно-связевые каркасы промзданий и анализ их влияния на работу таких конструктивных схем при сейсмическом воздействии, поэтому целью данной работы является численный анализ методом конечных элементов работы каркасов промышленных зданий в различных вариантах исполнения («традиционном» и с использованием энергопоглощающих элементов) при реализации сейсмического воздействия, на примере главного корпуса теплоэлектростанции (ТЭС) с газотурбинной установкой (ГТУ). Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

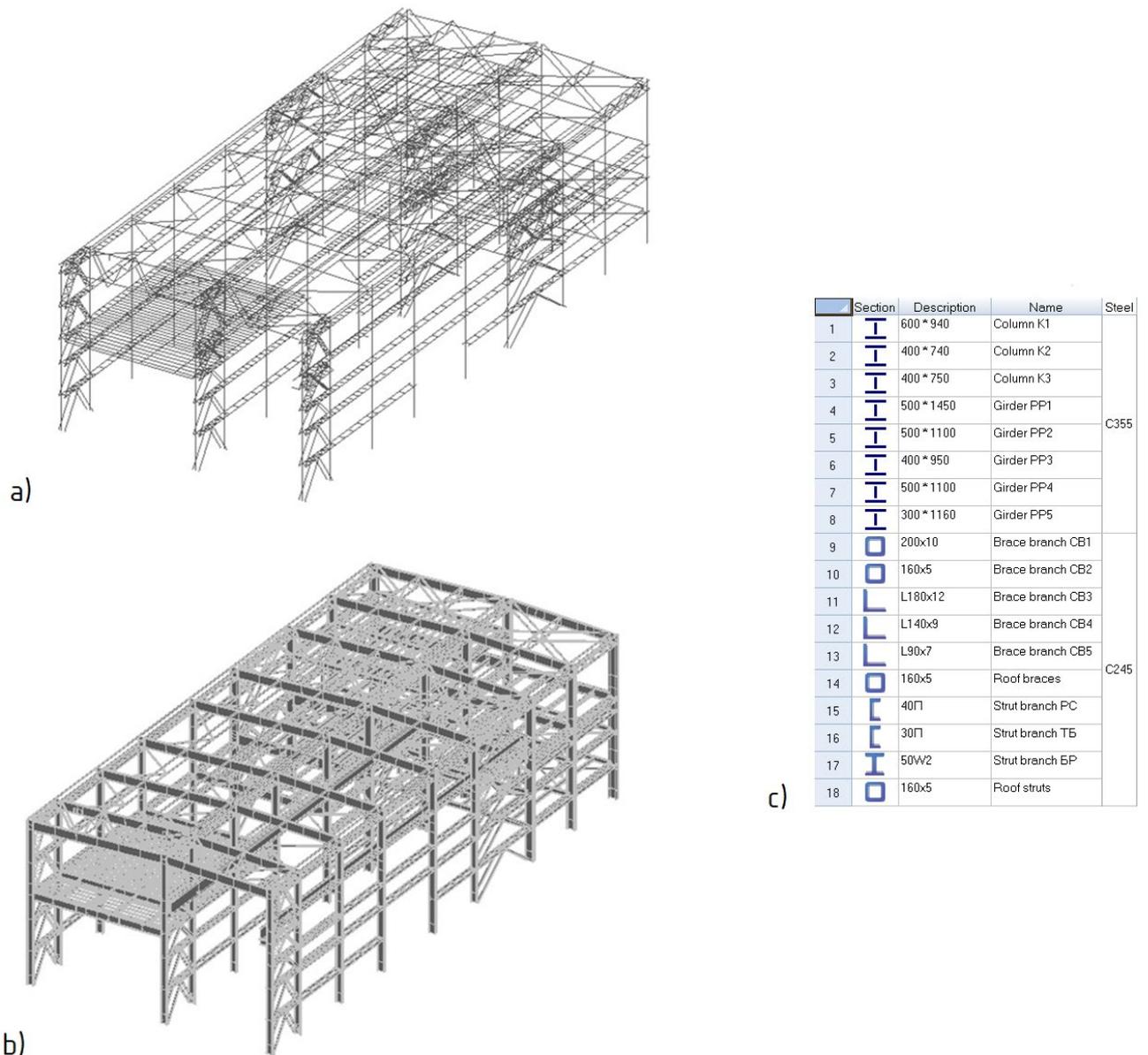
1. Определение узлов конструкции каркаса промышленного здания, в которых будет эффективно использование энергопоглощителей
2. Расчёт каркаса промышленного здания в варианте исполнения без энергопоглощающих элементов
3. Подбор сечений энергопоглощителей
4. Расчёт каркаса промышленного здания в варианте исполнения с энергопоглощающими элементами
5. Сравнение результатов расчета двух вариантов исполнения, определение эффекта от использования энергопоглощителей

Объектом исследования являются конструктивные решения каркасных зданий в условиях динамических нагрузжений.

Предметом исследования являются энергопоглощающие элементы в рамно-связевых каркасах промышленных зданий в условиях сейсмического воздействия.

## 2 Materials and Methods

В качестве объекта рассматривается стальной рамно-связевой каркас здания моноблочного главного корпуса ТЭС-ГТУ мощностью – 170 МВт. Элементы каркаса представляют собой поперечные двухпролетные рамы, ригели и колонны которых выполнены из сварных сплошностенчатых двутавров. Рамы связаны между собой балками-распорками и треугольными связями, а также горизонтальными и вертикальными связями в блоке покрытия, и выполнены преимущественно из гнутых прокатных профилей. Общий вид на расчетную и конструктивную схему каркаса с указанием сечений принятых элементов показаны на рисунке 1. Расчетная сейсмичность площадки принята равной – 9 баллов по шкале MSK-64.



**Рис. 1 – Вид на каркас здания главного корпуса ТЭС с ГТУ мощностью 170 МВт, где: а) геометрическая составляющая расчётной схемы, выполненная в ПК SCAD 21; б) общая конструктивная схема здания; в) таблица основных типов принятых сечений и материалов элементов каркаса**

**Fig. 1 - A view of the frame of the main building of the thermal power plant GTP with a capacity of 170 MW, where: a) the geometric component of the design scheme made in the SCAD 21 PC; b) the general structural scheme of the building; c) a table of the main types of accepted sections and materials of the frame elements**

К элементам каркаса были приложены все требуемые согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [19] и СП 90.13330.2012 «Электростанции тепловые» [20] нагрузки, а именно: собственный вес конструкций, нагрузки на кровлю, включая снеговые, нагрузки на перекрытия, нагрузки от технологического оборудования и трубопроводов, нагрузки от веса стенового покрытия, ветровые нагрузки, крановые от мостового и двух подвесных кранов и сейсмические нагрузки по трем ортогональным направлениям при различных положениях мостового крана.

Нагрузки на кровлю собраны с грузовой площади в места опирания прогонов на ригели, нагрузки на перекрытия и ветровые собраны с грузовой площадей и распределены на балки настила и колонны соответственно. Таблица расчетных сочетаний усилий (PCУ) из расчёта в ПК SCAD приведена на рис. 2.



№	Active loading	Active loading in DCD	Name	Type of loading	Type of load	Alternating	Involved in group operations			Safety factor	Fraction of duration
							Combinations	Mutual exclusion	Related loadings		
1	✓	✓	Own weight of steel	Permanent loads	Weight of steel structures	✓	✓	✓	1,05	1	
2	✓	✓	Permanent loads on roof	Permanent loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
3	✓	✓	Permanent loads from walls	Permanent loads	Other	✓	✓	✓	1,19	1	
4	✓	✓	Long-term loads on roof	Long-term loads	Weight of stationary equipment	✓	✓	✓	1,3	1	
5	✓	✓	Permanent loads on overlaps	Permanent loads	Other	✓	✓	✓	1,16	1	
6	✓	✓	Snow	Short-term loads	Full snow loads in the regions with an average January temperature greater than minus 5°C	✓	✓	✓	1,4	0,7	
7	✓	✓	Snow bag parapet 1 (axis B)	Short-term loads	Other	✓	✓	✓	1,4	0,7	
8	✓	✓	Snow bag parapet 2 (axis A)	Short-term loads	Other	✓	✓	✓	1,4	0,7	
9	✓	✓	Long-term loads on overlaps +11,200 (axes 1-4)	Long-term loads	Weight of stationary equipment	✓	✓	✓	1,2	1	
10	✓	✓	Mounting load on overlaps +11,200 (axes 1-4)	Short-term loads	Weight of people and repair materials in the service areas	✓	✓	✓	1,2	0	
11	✓	✓	Long-term loads on overlaps (axes 5-9)	Long-term loads	Weight of stationary equipment	✓	✓	✓	1,2	1	
12	✓	✓	Mounting load on overlaps (axes 5-9)	Short-term loads	Weight of people and repair materials in the service areas	✓	✓	✓	1,2	0	
13	✓	✓	Wind right (axis A)	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
14	✓	✓	Wind left (axis B)	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
15	✓	✓	Wind endface axis 1	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
16	✓	✓	Wind endface axis 9	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
17	✓	✓	Full wind right (axis A)	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
18	✓	✓	Full wind left (axis B)	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
19	✓	✓	Full wind endface axis 1	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
20	✓	✓	Full wind endface axis 9	Short-term loads	Wind loads	✓	✓	✓	1,4	0	
21	✓	✓	Long-term load from AFCS	Long-term loads	Weight of stationary equipment	✓	✓	✓	1,2	1	
22	✓	✓	Short-term load from AFCS	Short-term loads	Loads from the equipment in the nonstationary mode	✓	✓	✓	1,2	0	
23	✓	✓	Vertical from pipelines on 7,5	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
24	✓	✓	Horizontal X from pipelines on 7,5	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
25	✓	✓	Horizontal Y from pipelines on 7,5	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
26	✓	✓	Vertical from pipelines on 10,5	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
27	✓	✓	Horizontal X from pipelines on 10,5	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
28	✓	✓	Horizontal Y from pipelines on 10,5	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
29	✓	✓	Vertical from pipelines on 19	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
30	✓	✓	Horizontal X from pipelines on 19	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
31	✓	✓	Horizontal Y from pipelines on 19	Long-term loads	Other	✓	✓	✓	1,2	1	
32	✓	✓	Crane 5t load on the axis B	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
33	✓	✓	Crane 5t load on the axis 5	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
34	✓	✓	Braking crane 5t on the axis B	Crane	Braking "on the left", "load is on the left"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
35	✓	✓	Braking crane 5t on the axis 5	Crane	Braking "on the right", "load is on the right"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
36	✓	✓	Braking along crane 5t on the axis B	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
37	✓	✓	Braking along crane 5t on the axis 5	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
38	✓	✓	Crane 5t load on the axis B (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
39	✓	✓	Crane 5t load on the axis 5 (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
40	✓	✓	Crane 10t load on the axis B	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
41	✓	✓	Crane 10t load on the axis 5	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
42	✓	✓	Braking crane 10t on the axis B	Crane	Braking "on the left", "load is on the left"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
43	✓	✓	Braking crane 10t on the axis 5	Crane	Braking "on the right", "load is on the right"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
44	✓	✓	Braking along crane 10t on the axis B	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
45	✓	✓	Braking along crane 10t on the axis 5	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
46	✓	✓	Crane 10t load on the axis B (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
47	✓	✓	Crane 10t load on the axis 5 (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
48	✓	✓	Overhead crane axis 2 - load on the axis B	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
49	✓	✓	Overhead crane axis 2 - load on the axis A	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
50	✓	✓	Overhead crane axis 2 - braking on the axis B	Crane	Braking "on the left", "load is on the left"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
51	✓	✓	Overhead crane axis 2 - braking on the axis A	Crane	Braking "on the right", "load is on the right"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
52	✓	✓	Overhead crane axis 2 - braking along on the axis B	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
53	✓	✓	Overhead crane axis 2 - braking along on the axis A	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
54	✓	✓	Overhead crane axis 2 - load on the axis 5 (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
55	✓	✓	Overhead crane axis 2 - load on the axis A (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
56	✓	✓	Overhead crane axis 4 - load on the axis B	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
57	✓	✓	Overhead crane axis 4 - load on the axis A	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
58	✓	✓	Overhead crane axis 4 - braking on the axis B	Crane	Braking "on the left", "load is on the left"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
59	✓	✓	Overhead crane axis 4 - braking on the axis A	Crane	Braking "on the right", "load is on the right"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
60	✓	✓	Overhead crane axis 4 - braking along on the axis B	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
61	✓	✓	Overhead crane axis 4 - braking along on the axis A	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
62	✓	✓	Overhead crane axis 4 - load on the axis 5 (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
63	✓	✓	Overhead crane axis 4 - load on the axis A (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
64	✓	✓	Overhead crane axis 6 - load on the axis B	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
65	✓	✓	Overhead crane axis 6 - load on the axis A	Crane	Full vertical loads from overhead travelling and underslung cranes	✓	✓	✓	1,2	0,5	
66	✓	✓	Overhead crane axis 6 - braking on the axis B	Crane	Braking "on the left", "load is on the left"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
67	✓	✓	Overhead crane axis 6 - braking on the axis A	Crane	Braking "on the right", "load is on the right"	✓	✓	✓	1,2	0,5	
68	✓	✓	Overhead crane axis 6 - braking along on the axis B	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
69	✓	✓	Overhead crane axis 6 - braking along on the axis A	Crane	Braking along a crane runway	✓	✓	✓	1,2	0,5	
70	✓	✓	Overhead crane axis 6 - load on the axis 5 (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
71	✓	✓	Overhead crane axis 6 - load on the axis A (seismic)	Crane	Crane with seismic action	✓	✓	✓	1,2	0,5	
72	✓	✓	Seismic X overhead crane on axis 2	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
73	✓	✓	Seismic Y overhead crane on axis 2	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
74	✓	✓	Seismic 45 overhead crane on axis 2	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
75	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 2 with X	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
76	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 2 with Y	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
77	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 2 with 45	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
78	✓	✓	Seismic X overhead crane on axis 4	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
79	✓	✓	Seismic Y overhead crane on axis 4	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
80	✓	✓	Seismic 45 overhead crane on axis 4	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
81	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 4 with X	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
82	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 4 with Y	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
83	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 4 with 45	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
84	✓	✓	Seismic X overhead crane on axis 6	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
85	✓	✓	Seismic Y overhead crane on axis 6	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
86	✓	✓	Seismic 45 overhead crane on axis 6	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
87	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 6 with X	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
88	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 6 with Y	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
89	✓	✓	Seismic Z overhead crane on axis 6 with 45	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
90	✓	✓	Seismic X without cranes, snow and mounting	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
91	✓	✓	Seismic Y without cranes, snow and mounting	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
92	✓	✓	Seismic 45 without cranes, snow and mounting	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
93	✓	✓	Seismic Z without cranes, snow and mounting with X	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
94	✓	✓	Seismic Z without cranes, snow and mounting with Y	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	
95	✓	✓	Seismic Z without cranes, snow and mounting with 45	Special load	Seismic actions	✓	✓	✓	1	0	

Рис. 2 – Таблица расчетных сочетаний усилий (PCY) из расчёта в ПК SCAD  
 Fig. 2 – Table of design combinations of forces from the calculation in the SCAD PC

Численный анализ пространственной работы каркаса здания, а также напряжений и деформаций, возникающих в элементах каркаса в различных вариантах исполнения, при реализации сейсмического воздействия, проводился в 3 этапа с использованием программных комплексов SCAD (<https://scadsoft.com/>), ЛИРА 10 (<https://lira-soft.com/>) и ANSYS (<https://www.ansys.com/>):

- 1 этап – расчёт каркаса здания в варианте исполнения без использования энергопоглощающих элементов (энергопоглощителей);



- 2 этап - подбор по усилиям и сочетаниям усилий, полученных в результате реализации 1 этапа, сечений и материалов элементов энергопоглощения, численный анализ их работы;
- 3 этап – расчет каркаса здания в варианте исполнения с подобранными энергопоглощающими элементами, сравнение с расчетным вариантом без энергопоглощителей.

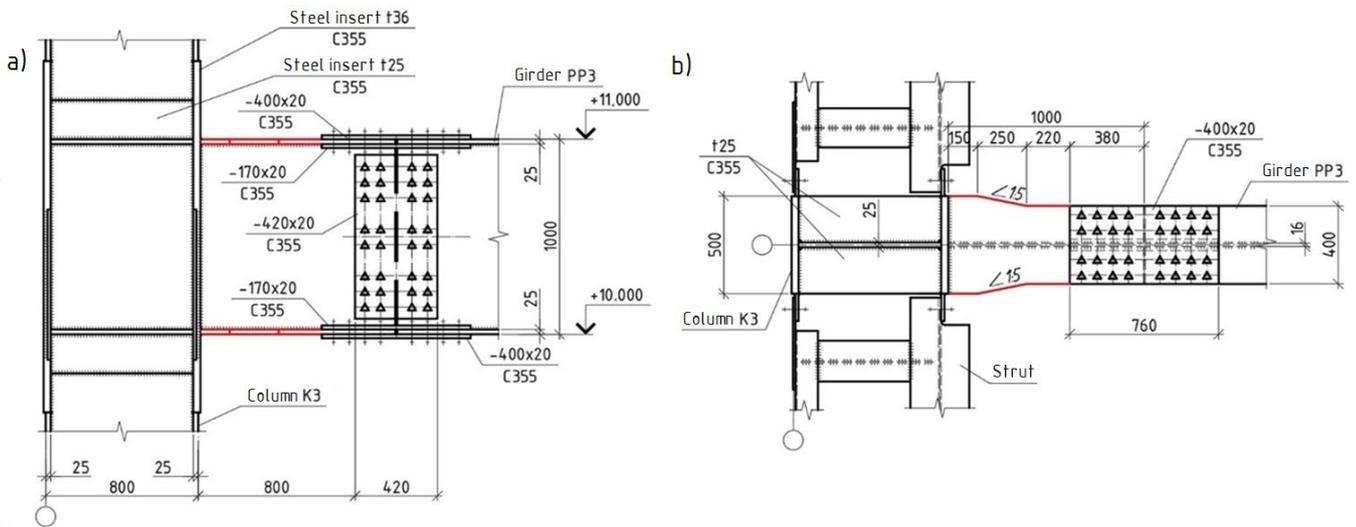
На 1 этапе расчёт каркаса здания в варианте исполнения без энергопоглощителей выполнялся методом конечных элементов в объемной постановке, при этом согласно п. 5.2 СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [1] для двух расчетных ситуаций, а именно: расчётное и контрольное землетрясение.

Расчётное землетрясение (РЗ) предполагает проектный учет предельных состояний по первой группе, для общей оценки выбранных сечений элементов конструкций на прочность, жесткость и устойчивость, и проводился в данной работе в ПК SCAD 21.1.9.9 линейно-спектральным методом в частотной области.

Расчет на контрольное землетрясение (КЗ), является фактически проверочным расчётом. Данный анализ проводился в ПК ЛИРА 10.12 с учетом физической нелинейности работы стали принятой по обобщенной диаграмме на основании СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [21], был также учтен коэффициент условий работы  $m_{tr}$  (согласно п. 5.15 СП 14.13330.2018 [1]). Расчетная оценка выполнялась во временной области методом прямого интегрирования уравнений движения с применением синтезированных акселерограмм по трём ортогональным направлениям, в качестве основного критерия было принято – необрушение конструкций.

На 2 этапе по усилиям и сочетаниям усилий из расчётов на РЗ и КЗ каркаса без использования энергопоглощителей производится первичный выбор сечений и физико-механических характеристик энергопоглощителей, с целью дальнейшего численного анализа их работы в составе каркаса здания главного корпуса ТЭС с ГТУ. Логика выбора конструкций энергопоглощителей основана на том, обстоятельстве, чтобы они включались в работу при пиковых сейсмических нагрузках, не допуская разрушения основных элементов каркаса здания. То есть, подбор элементов осуществляется по наибольшим усилиям (наиболее неблагоприятным их сочетаниям) в элементах конструкций, полученным в результате расчёта на расчетное землетрясение (РЗ), и в предположении их упругой стадии работы при данных усилиях (сочетаниях). Затем, осуществляется проверка подобранных сечений и характеристик стали при максимальных усилиях, реализующихся при расчёте на контрольное землетрясение, то есть проверяется, что они, переходя в упругопластическую стадию работы, рассеивают энергию колебаний и не теряют несущую способность.

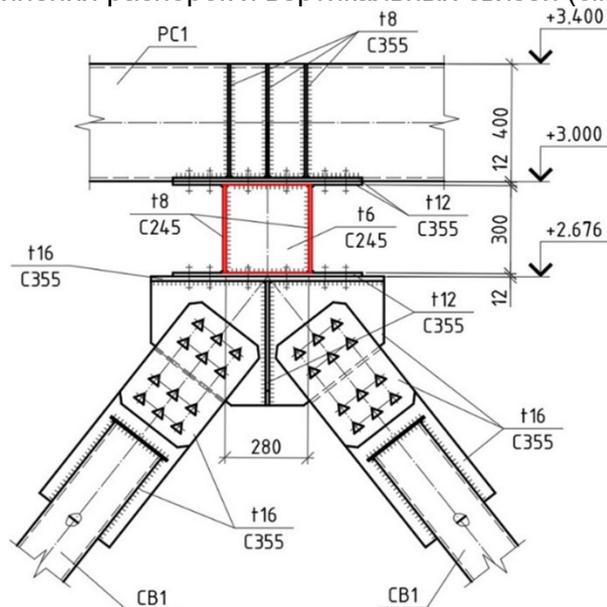
В рамках при жестком сопряжении ригелей с колоннами и колонн с фундаментом, как правило энергопоглощающие элементы располагают в рамном узле ригеля с колонной [22]-[23]. В некоторых исследованиях предлагается использование поясов ригеля и расширение их в месте стыка с колонной [24]-[25], в других рассматривается вариант с использованием накладок узла на высокопрочных болтах в качестве энергопоглощающих элементов [26]-[28]. В нашем случае принят наиболее простой вариант: энергопоглощителями в поперечном направлении каркаса здания являются пояса ригелей, опорные сечения которых развиты за счёт увеличения ширины полки во избежание хрупкого разрушения в месте сварного стыка стенки и поясов с полкой колонны. Узлы сопряжения отпавочных марок ригелей с колоннами – на высокопрочных болтах с выносом монтажного стыка из зоны действия предполагаемого максимального изгибающего момента, а именно участка непосредственного примыкания ригеля к колонне (см. рисунок 3).



**Рис. 3 – Принятый узел сопряжения ригеля с колонной, где: а) профиль узла; б) вид сверху на узел. Красным цветом выделен участок уширения полки ригеля (принятая конструкция энергопоглотителя)**

**Fig. 3 – The accepted connection of the girder with the column, where: a) the profile of the detail; b) the top view of the detail. The section of the widening of the crossbar flanges is highlighted in red (the adopted design of the energy absorber)**

В продольном направлении каркаса здания рассматриваются вертикальные сдвиговые энергопоглотители (ЭПС) [29]-[30], представляющие собой вставки из сварного двутавра, расположенные в узлах соединения распорок и вертикальных связей (см. рисунок 4).



**Рис. 4 – Вид на рассматриваемую конструкцию сдвигового вертикального энергопоглотителя, установленного в узле сопряжения балок-распорок и связей в продольном направлении каркаса здания. Красным цветом выделена конструкция сдвигового вертикального энергопоглотителя**

**Fig. 4 – A view of the considered design of a vertical shear energy absorber (VSL) installed in the connection of strut and braces in the longitudinal direction of the building frame. The shear vertical energy absorber is highlighted in red**

На 3 этапе расчёт каркаса здания в варианте исполнения с энергопоглотителями выполнялся также методом конечных элементов в объемной постановке, но только для расчетной ситуации контрольного землетрясения (КЗ) в ПК ЛИРА 10.12 с учетом физической нелинейности работы стали, чтобы учесть эффект от применения предлагаемых элементов.



Основной вывод послужило произведенное сравнение результатов расчёта на КЗ двух вариантов решения конструктивных схем, а именно с использованием энергопоглощающих элементов (энергопоглощителей) в составе элементов, узлов и примыканий каркаса и без них.

### 3 Results and Discussion

На 1 этапе исследования по результатам расчёта на РЗ каркаса здания в варианте исполнения без энергопоглощителей были окончательно приняты сечения элементов (рисунок 1с), а также определены наибольшие усилия и наиболее неблагоприятные сочетания усилий для подбора энергопоглощающих элементов.

В частности, определены наиболее неблагоприятные сочетания усилий в опорных частях ригелей, для подбора и расчёта их поясов, как энергопоглощителей. Полученные сочетания для рассматриваемого в данной работе ригеля РРЗ, изображенного на рис. 3 приведены в табл. 1. Схема реализации основных усилий представлена на рис. 6.

**Таблица 1. Сочетания усилий из расчета на РЗ для подбора элементов энергопоглощения ригеля**  
**Table 1. Combinations of forces based on the design earthquake calculation for the selection of energy absorption elements of the girder**

	Продольная сила N, кН	Изгибающий момент $M_y$ , кН*м	Поперечная сила $Q_z$ , кН*м	Изгибающий момент $M_z$ , кН*м	Поперечная сила $Q_y$ , кН*м	Крутящий момент $M_k$ , кН*м
Сочетание РЗ	57	-2970	891	7	-2	-0.004

Также определены наибольшие значения продольных усилий в распорках между колоннами, для подбора сдвиговых энергопоглощителей. Для рассматриваемого в данной работе узла (рисунок 4) максимальная по значению продольная сила в распорке РС1 составила  $N_{сдРЗ} = -300$  кН.

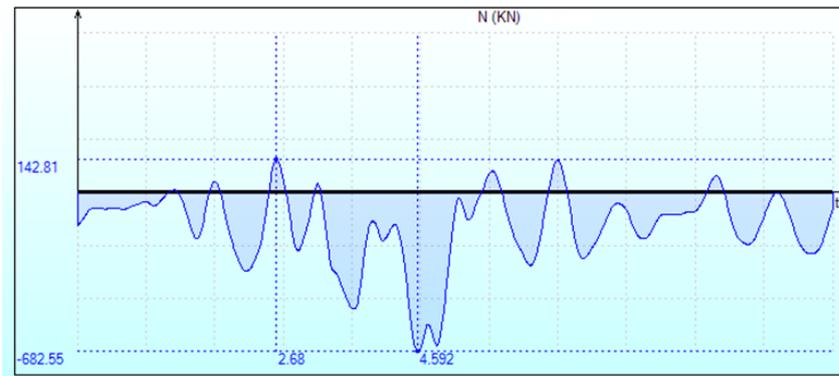
Также по результатам расчёта на РЗ период первого тона колебаний здания равен  $T_1 = 2.34$  секунды.

По результатам расчёта на КЗ каркаса здания в варианте исполнения без энергопоглощителей была произведена оценка работы каркаса, он сохранил общую устойчивость, обрушения не ожидается. Кроме того, аналогично РЗ, определены усилия и сочетания усилий при пиковых сейсмических нагрузках уже для проверки работы энергопоглощающих элементов. Полученные сочетания расчетных усилий из расчета на КЗ для рассматриваемого в данной работе ригеля РРЗ, изображенного на рис. 3 приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Сочетания усилий из расчета на КЗ для проверки элементов энергопоглощения ригеля**  
**Table 2. Combinations of forces based on the verification (safe shutdown) earthquake calculation to check the energy absorption elements of the crossbar**

	Продольная сила N, кН	Изгибающий момент $M_y$ , кН*м	Поперечная сила $Q_z$ , кН*м	Изгибающий момент $M_z$ , кН*м	Поперечная сила $Q_y$ , кН*м	Крутящий момент $M_k$ , кН*м
Сочетание КЗ	51	-4404	1096	160	23	5

На рис. 5 представлен график зависимости продольной силы N в распорке РС1 из рассматриваемого узла (рис. 4) от времени при расчёте на КЗ в ПК ЛИРА 10.12.



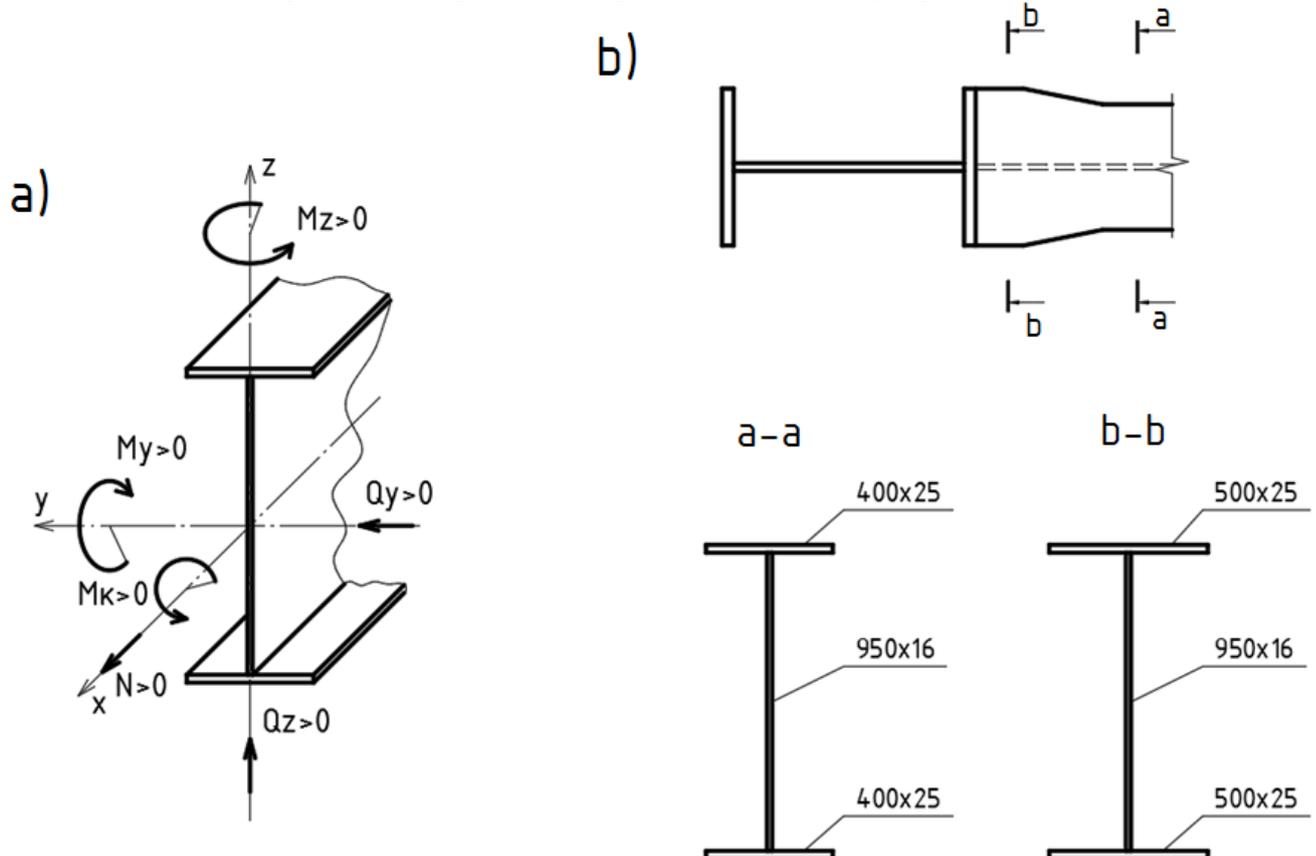
**Рис. 5 – Зависимость усилия  $N$  в распорке PC1 (рис. 3) от времени при расчёте на КЗ**

**Fig. 5 – The dependence of the force  $N$  in the strut PC1 (Fig. 3) on time during calculation for a verification (safe shutdown) earthquake**

Из графика видно, что максимальная по значению продольная сила в распорке PC1 при пиковых нагрузках при КЗ составила  $N_{сдКЗ} = -682.55$  кН.

Энергопоглотителями в поперечном направлении каркаса здания выступают пояса ригелей, опорные сечения которых развиваются за счёт увеличения ширины полки (см. рисунок 3). Монтажный стык на высокопрочных болтах принят равнопрочным основному сечению.

Геометрические характеристики рассматриваемой в расчёте области и указание схемы реализации основных усилий, для указанного узла, показаны на рисунке 6.



**Рис. 6 – К расчёту узла опирания ригеля на колонну каркаса, где а) схема реализации**

**основных усилий; б) рассматриваемые сечения и их геометрические характеристики**

**Fig. 6 – To the calculation of the crossbar support on the frame column, where а) the scheme of the implementation of the main forces; б) the sections under consideration and their geometric characteristics**

В расчёте принято граничное условие работы узла, заключающееся в том, что: при полученном сочетании усилий в опорной части ригеля из расчёта на РЗ (результаты см. табл. 1)



как опорное сечение ригеля (сечение а-а, рисунок 6б), так и основное пролётное (сечение b-b, рисунок 6б) должны работать в упругой стадии и их прочность без учета пластических деформаций должна быть обеспечена. А при сочетании усилий от пиковых сейсмических нагрузок из расчета на КЗ (результаты см. табл. 2) опорное сечение ригеля (сечение а-а, рисунок 6б) должно работать в упругой стадии и его прочность без учета пластических деформаций должна быть обеспечена, при этом основное пролётное сечение (сечение b-b, рисунок 6б) должно работать упругопластически, рассеивая энергию колебаний, то есть прочность без учета пластических деформаций обеспечена не будет, но при этом должна быть обеспечена прочность с учетом пластических деформаций.

Расчетная проверка ригеля на прочность по сечениям а-а и b-b (рисунок 6б) проводится из условий, принятых по таблице 1 и 2 сочетаний усилий, при действии продольной силы с изгибом по п. 9.1.1 (формулы 105, 106) СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [21]. Как без учета, так и с учетом пластических деформаций (то есть без и с использованием коэффициентов для расчёта элементов конструкций с учётом развития пластических деформаций  $s_x$ ,  $s_y$  и  $n$  по прил. Е [21]). Также учитывается коэффициент условий работы  $m_{tr}$  согласно [1]. Результаты этой проверки сведены в таблицу 3, в ней приведены значения, полученные по формуле (105/106) [21]. Где, при значении меньше 1, прочность считается обеспеченной, больше – нет.

**Таблица 3. Проверка сечений и их элементов для ригеля в области опирания на колонну**  
**Table 3. Checking the cross sections and their elements for the crossbar around support on the column**

Расчетная ситуация	Критерий	Полученное в результате значение расчетной оценки по формуле 105/106 [21]	
		Ригель в сечении «а-а»	Ригель в сечении «b-b»
РЗ (сочетание усилий из табл. 1)	Прочность при действии продольной силы с изгибом (п. 9.1.1 [21]) без учёта развития пластических деформаций	0.597 (прочность обеспечена, работа элемента конструкции в упругой стадии)	0.494 (прочность обеспечена, работа элемента конструкции в упругой стадии)
КЗ (сочетание усилий из табл. 2)	Прочность при действии продольной силы с изгибом (п. 9.1.1 [21]) без учёта развития пластических деформаций	1.141 (прочность элемента конструкции не обеспечена)	0.897 (прочность обеспечена, работа элемента конструкции в упругой стадии)
	Прочность при действии продольной силы с изгибом (п. 9.1.1 [21]) с учётом развития пластических деформаций	0.968 (прочность обеспечена, работа элемента конструкции в упругопластической стадии)	-

При оценке на РЗ в обоих сечениях (как опорное, так и пролетное (а-а и b-b соответственно, см. рисунок 6б)) ригеля, установлено, что его элементы работают в упругой стадии. Расчетная оценка при реализации пиковых сейсмических нагрузок (на КЗ), показала, что место соединения

ригеля с колонной работает в упругой стадии, в то время как в пролетном сечении пояса ригеля рассеивают энергию (то есть выполняют функцию энергопоглотителей).

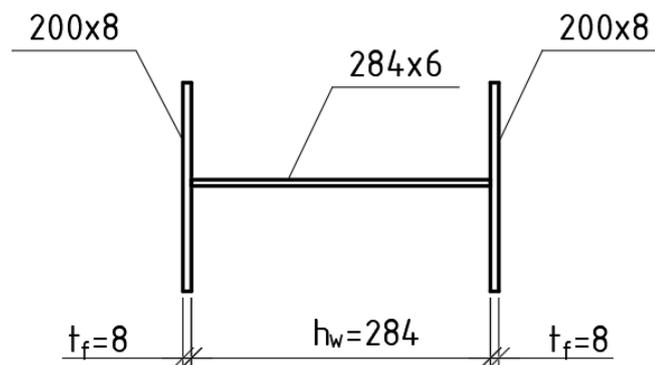
Энергопоглотитель вертикальный сдвиговой (ЭПС), имеет сечение сварного двутавра (см. рис. 4) Поэтапный подбор сечения элементов ЭПС приводится в табличной форме (см. табл. 4). Сечение стенки подбирается из расчета по прочности на сдвиг, где сдвигающей силой, выступает, продольная сила в распорке РС1 (см. рис. 4), которая, как было указано выше, в данной работе равна  $N_{сдРЗ} = 300$  кН, высота ЭПС принята исходя из соотношения высоты и ширины [31]-[34], а сечение полки из расчета на прочность при действии продольной силы, возникающей в поясе от расчетного изгибающего момента.

**Таблица 4. Подбор геометрических элементов ЭПС**  
**Table 4. Selection of geometric elements of the vertical shear energy absorber (vertical shear link (VSL))**

№ п/п	Конструктивный элемент энергопоглотителя	Расчетная формула	Минимально требуемое значение	Принятое значение
1	Площадь сечения стенки, $A_w$	$A_w = N_{сдРЗ} \cdot (0.58 \cdot R_y \cdot m_{tr} \cdot \gamma_c)$ (формула 54 [21])	16.58 см <sup>2</sup>	17.04 см <sup>2</sup> (сечение стенки: 284 × 6 мм)
2	Высота элемента, Н	-	По рекомендациям [31]-[34]	300 мм
3	Площадь сечения полки, $A_f$	$A_f = (N_{сдРЗ} \cdot H(h_w + t_f)) \cdot (R_y \cdot m_{tr} \cdot \gamma_c)$ (формула 5 [21])	9.88 см <sup>2</sup> , толщина полки по рекомендациям [35]-[36]	16 см <sup>2</sup> (сечение полки: 200 × 8 мм)

Примечание:  $R_y$  – расчётное сопротивление стали, принятое по табл. В.3 [21], равным 240 МПа (для стали С245);  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принят по табл. 1 [21], равным 1;  $m_{tr}$  – коэффициент условий работы при сейсмическом воздействии, принят по табл. 5.4 [1], равным 1.3;  $h_w$  – высота стенки ЭПС, в мм;  $t_f$  – толщина полки ЭПС, в мм.

Подобранное сечение ЭПС изображено на рисунке 7.



**Рис. 7 – Вид на подобранное сечение элемента ЭПС**

**Fig. 7 – View of the selected section of the vertical shear energy absorber (vertical shear link (VSL))**

Для проверки работы ЭПС, подобранного в таблице 4 сечения, сравниваются наибольшие относительные пластические деформации, возникающие в ЭПС с допустимыми.

Вычисление уровня относительных пластических деформаций, возникающих в энергопоглотителе было выполнено с помощью математического моделирования непосредственно рассматриваемого узла каркаса здания в объемной постановке в ПК ANSYS Workbench 2022 R1, результаты приводятся ниже по тексту.

Так расчётная схема, выполненная в ПК ANSYS Workbench 2022 R1 приведена на рисунке 8. Крепление элементов в моделируемом узле принято: внизу вертикальных связей – шарнирно,

слева в балках распорок – закреплены упругой связью, имеющей жесткость распорки. В качестве расчетной нагрузки, моделирующей работу узла при сейсмическом воздействии, принято – усилие равное  $N_{сдкз} = -682.55$  кН (из расчета на КЗ, см. выше по тексту), которое приложено по сечению балок-распорок. С помощью инструмента Mesh была разбита стандартная тетраэдрическая регулярная сетка конечных элементов, средней их крупностью, равной –  $25 \times 25 \times 25$  мм. Нелинейные свойства стали, для элементов конструкций, приняты по билинейной диаграмме с упрочнением в соответствии с приложением В СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [21].

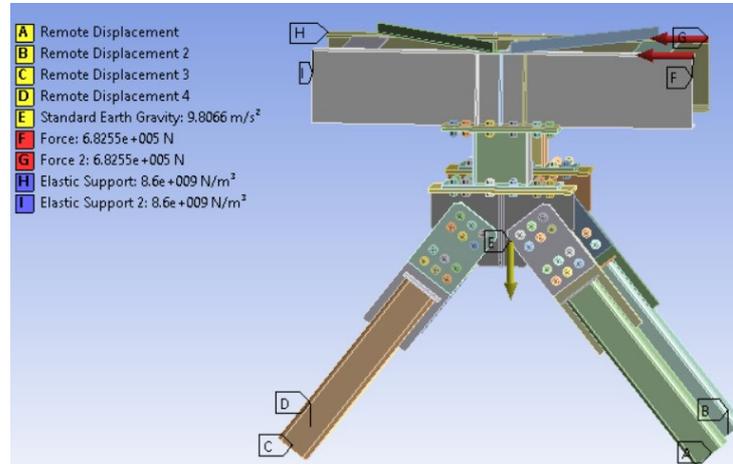


Рис. 8 – Общий вид на расчетную схему, выполненную в ПК ANSYS Workbench 2022 R1, где: А, В, С, D – шарнирные закрепления; E – земная гравитация (дает собственный вес элементам); F, G - приложенная нагрузка,  $N_{сдкз} = -682.55$  кН; H, I – упругая связь, имеющая жесткость распорок, равная –  $8.6 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

Fig. 8 – A general view of the design scheme made in the PC ANSYS Workbench 2022 R1, where: A, B, C, D – hinge fastenings; E - Earth gravity (gives its own weight to the elements); F, G - applied load,  $N_{сдкз} = -682.55$  кН; H, I – elastic supports having a struts stiffness equal to –  $8.6 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

Результаты расчетной оценки относительных пластических деформаций, полученные в ПК ANSYS Workbench 2022 R1, приведены на рис. 9.

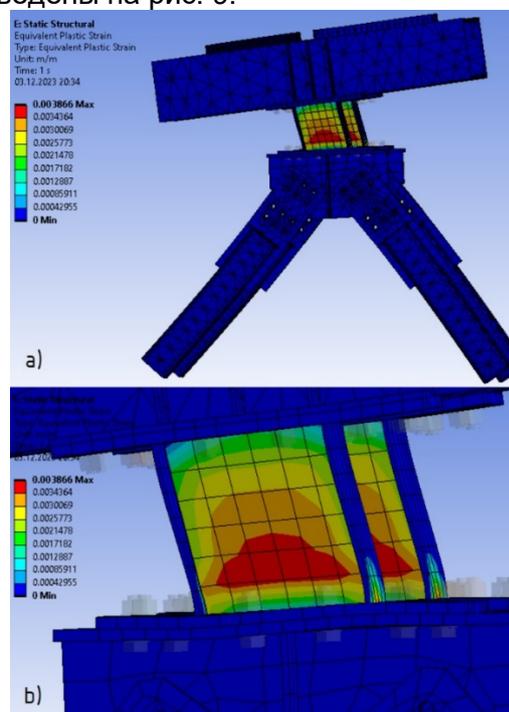


Рис. 9 – Результаты относительных пластических деформаций, реализующиеся в элементах ЭПС, где а) общий вид модели узла; б) вид на элемент ЭПС.

Fig. 9 – The results of equivalent plastic strain realized in the VSL elements, where a) the general view of the detail model; б) the view of the VSL element.



На основании результатов, показанных рисунке 9 видно, что в упругопластическую работу перешёл только ЭПС, а остальные элементы узла работают в упругой стадии. Кроме того, максимальные относительные пластические деформации, возникающие в элементе ЭПС при расчетном сейсмическом воздействии равны в долях – 0.0039.

При этом допустимые относительные деформации для указанного типа конструкций не регламентированы в нормах РФ [21], [37], но имеются требования п. 4.3.1, 4.4.2 и 4.4.3 СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования» [37], где указано, что относительные пластические деформации  $\xi_N$  ограничиваются пределом в 4–5 % (в долях: 0.04 – 0.05), следовательно принимаем значение 0.05, как допустимое по нормам РФ.

Однако, как правило, допустимые относительные деформации для таких элементов получают из расчёта на малоцикловую прочность [38]. В нормах РФ [21], [37] не приводится подходящих методик, поэтому в данной работе используется методика, описанная в Пособии по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий [33], основанная на уравнении Мэнсона-Коффина.

Оценка малоциклового прочности элементов принятой конструкции ЭПС приведена в табличной форме (см. таблица 5).

**Таблица 5. Оценка малоциклового прочности элементов принятой конструкции ЭПС**  
**Table 5. Evaluation of the low-cycle strength of the elements of the adopted design of the VSL**

№	Характеристика рассчитываемого показателя	Принятые начальные граничные условия	Расчетная формула	Полученное расчетное значение
1	Предельная упругая относительная деформация стали, $C$	Значение относительного сужения образца стали в момент разрушения при статическом нагружении, принято, как для малоуглеродистой стали – $\psi_k = 0.535$ [38]	$C = 0.5 \cdot \ln(1/(1 - \psi_k))$ [38]	0.383
2	Число циклов нагружения, которые будут выдерживать ЭПС за 2 землетрясения: расчётного и на 1 балл меньше до появления первых признаков разрушения, $N$	Продолжительность землетрясения $t$ , принята равной не более 30 секунд [38], а период первого тона колебаний здания из расчёта на РЗ – $T_1 = 2.34$ секунды (см. выше по тексту)	$N = 2 \cdot t/T_1$ [38]	25.64
3	Предельные относительные пластические деформации, $\xi_N$	Значение коэффициента $m$ , принято, как для малоуглеродистой стали, то есть равным – 0.5 [38]	$\xi_N = C/N^m$ [38]	0.0757

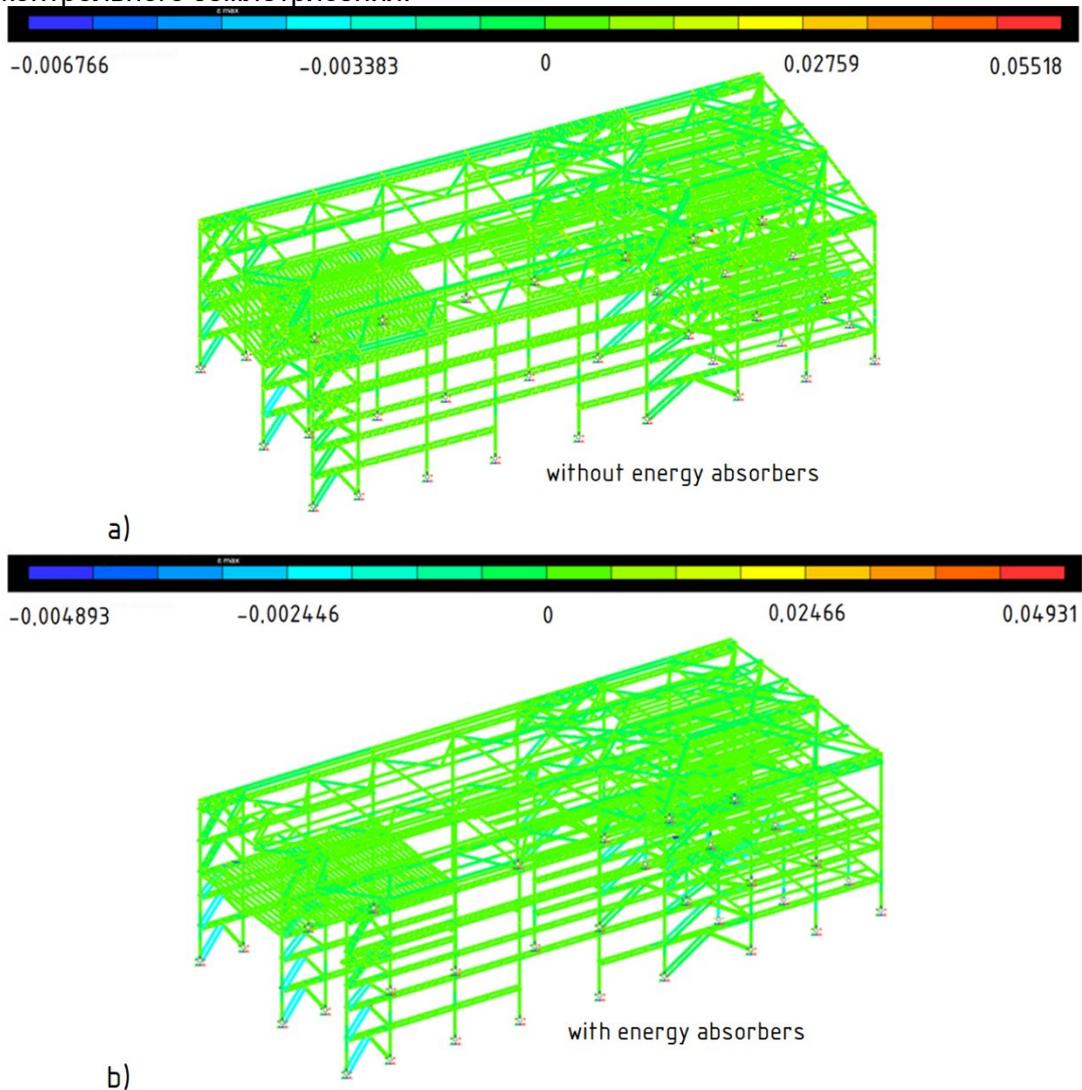
В результате выполненной расчетной оценки установлено, что значение допустимых относительных деформаций, развивающихся в элементах ЭПС, по указанной методике в долях равно – 0.0757. Окончательно имеем два значения допустимых относительных деформаций: 0.05 по нормам РФ и 0.0757 по расчёту.

В итоге, максимальные относительные пластические деформации, возникающие в элементе ЭПС при расчетном сейсмическом воздействии и равные в долях – 0.0039, меньше допустимых 0.05 и 0.0757, соответственно проверка пройдена и сечение подобрано верно.

По результатам расчёта на КЗ каркаса здания в варианте исполнения с подобранными энергопоглотителями была произведена общая оценка работы каркаса, он сохранил общую устойчивость, и обрушения его элементов не прогнозируется.

Для оценки вклада энергопоглотителей в общую работу каркаса сооружения было выполнено сравнение результатов расчёта на КЗ в обоих вариантах его исполнения (с энергопоглотителями и без них). Так на рисунке 10 приводятся результаты, полученные в ходе

расчета на КЗ всего каркаса здания, а именно, приведены – предельные относительные деформации элементов каркаса в двух вариантах его исполнения, во времени. Так как к моменту окончания расчёта в некоторых элементах накопились пластические (остаточные) деформации, которые составляют большую часть общих деформаций каркаса, то по ним можно после снятия сейсмической нагрузки судить о развивающихся напряжениях в его элементах, которые возникают во время контрольного землетрясения.

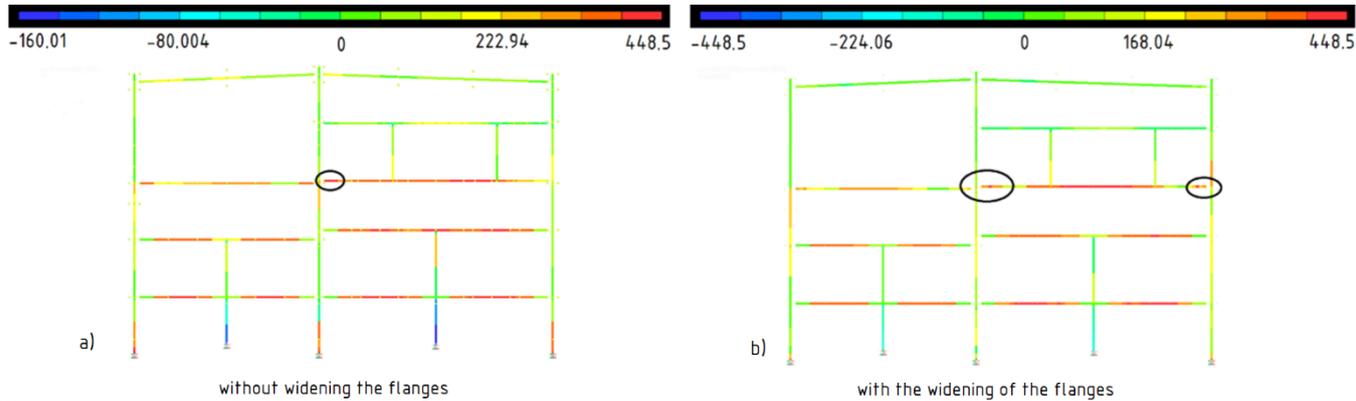


**Рис. 10 – Предельные относительные деформации элементов каркаса здания главного корпуса ТЭС с ГТУ 170 МВт в момент окончания землетрясения, при расчёте на КЗ, где: а) без энергопоглотителей; б) с энергопоглотителями**

**Fig. 10 – Limiting equivalent plastic strain of the building frame elements of the main building of the thermal power plant GTP with a capacity of 170 MW at the end of the earthquake, when calculated for a verification (safe shutdown) earthquake, where: a) without energy absorbers; b) with energy absorbers**

Как видно из рисунка 10, ни один из элементов не достиг относительных деформаций, соответствующих временным сопротивлениям материалов (для стали марки С245 – 0.2189; С355 – 0.1925 согласно приложению В [21]). Таким образом, разрушения элементов не ожидается.

Однако в варианте без энергопоглотителей в трех ригелях каркаса могут развиваться относительные пластические деформации, превышающие максимально допустимые значения ( $0.55 > 0.5$ ), согласно пп. 4.3.1, 4.4.2 и 4.4.3 [37], поэтому, ниже приводятся результаты более подробного анализа напряженно-деформированного состояния в самой нагруженной раме каркаса, при реализации пиковых нагрузок от КЗ (см. рисунок 11).



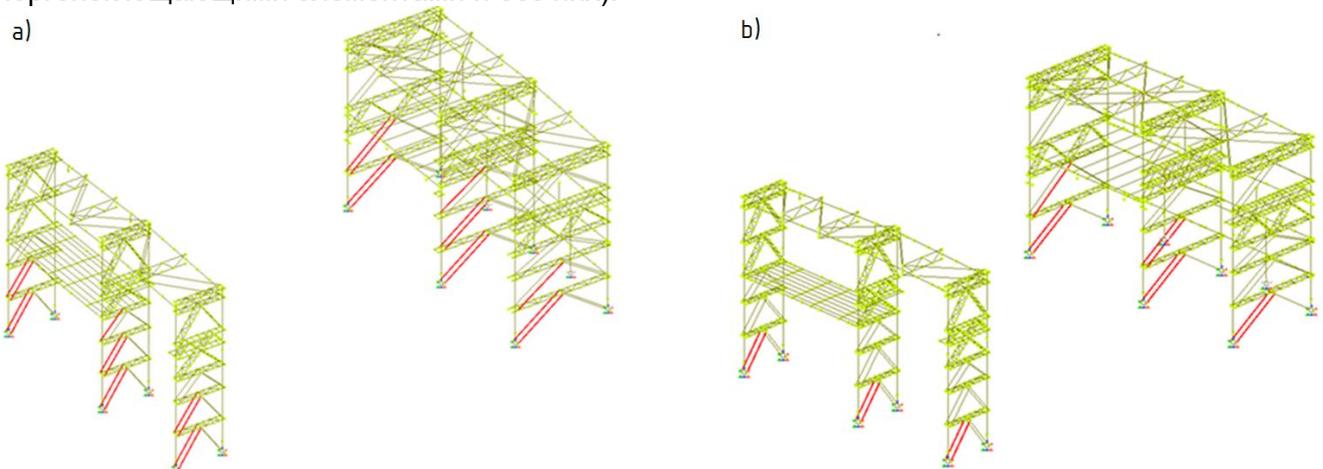
**Рис. 11 – Нормальные напряжения в МПа развивающиеся в элементах самой нагруженной рамы каркаса здания главного корпуса ТЭС с ГТУ 170 МВт в момент наибольших ускорений основания, где: а) ригели без уширения полок; б) ригели в энергопоглощающей конструкции (т.е. с уширением полок). Овалами обозначены зоны реализации напряжений близких к пределу текучести стали**

**Fig. 11 – Normal stresses in MPa developing in the elements of the most loaded transverse frame of the of the main building of the thermal power plant GTP with a capacity of 170 MW at the time of the greatest accelerations of the base, where: a) girders without widening the flanges; b) girders in an energy-absorbing structure (with the widening of the flanges). Ovals indicate the zones of realization of stresses close to the yield strength of steel**

Как видно, в обозначенных на рисунке 11 зонах, напряжения соответствуют заданному пределу текучести стали (равны – 448.5 МПа), следовательно, в варианте конструктивного решения без энергопоглотителей, где не предусмотрено уширение полок ригелей, появляется опасность разрушения сварного соединения по металлу шва или же по полосе околосшовного пространства, где в результате технологических структурных изменений, может реализовываться состояние, при котором предел текучести несколько меньше чем у основного металла конструкции [34]. При этом, в варианте исполнения ригеля в энергопоглощающей конструкции (с уширением полок ригеля), наиболее напряженные участки, соответствующие заданному пределу текучести стали, несколько удалены от узла сопряжения с колонной, и в самом узле составляют значения, меньше этих пределов, следовательно, сварное соединение ригеля с колонной (см. рис. 3) находится в упругой стадии работы, а значит снижается вероятность его разрушения при наступлении реального землетрясения в процессе эксплуатации.

Для оценки влияния ЭПС на общую работу каркаса проверена устойчивость вертикальных связей по колоннам, в соединения которых, с распорками и были внедрены ЭПС.

На рисунке 12 приводятся результаты расчета на КЗ в сравнении двух конструктивных исполнениях связей по каркасу здания главного корпуса ТЭС с ГТУ 170 МВт (с энергопоглощающими элементами и без них).



**Рис. 12 – Результаты расчета на КЗ в сравнении двух конструктивных исполнениях связей по каркасу здания главного корпуса ТЭС с ГТУ 170 МВт, где: а) без энергопоглощающих**



элементов; b) с энергопоглощающими элементами. Красным цветом выделены связи, потерявшие устойчивость

**Fig. 12 – Calculation results for a verification (safe shutdown) earthquake in comparison of two structural designs of braces along the frame of the main building of the thermal power plant GTP with a capacity of 170 MW, where: a) without energy-absorbing elements; b) with energy-absorbing elements. Connections that have lost stability are highlighted in red**

Таким образом, установлено, что в варианте исполнения каркаса без энергопоглощающих элементов в узле примыкания связей, предполагается потеря устойчивости 24 элементов, в варианте с энергопоглотителями – 15 вертикальных связей по колоннам (на 37.5 % меньше), следовательно, реальная работа каркаса здания и его стойкость против землетрясения повышается.

При этом стоит отметить, что масса металла на указанные решения энергопоглотителей незначительна по сравнению с массой металла всего каркаса (табл. 6) и данные решения можно внедрять без увеличения сметной стоимости возведения каркаса.

**Таблица 6. Расход металла на решение каркаса с энергопоглотителями**  
**Table 6. Metal consumption for a design solution of the frame with energy absorbers**

	Каркас здания	Уширение поясов ригелей в месте соединения с колонной	Энергопоглотители вертикальные сдвиговые (ЭПС)
Расход металла, т	731.05	0.648	0.66
Доля от общего расхода на каркас, %	100	0.089	0.09

## 4 Conclusions

1. Предложены варианты внедрения энергопоглощающих элементов в рамно-связевой каркас промышленного здания, а именно в рамный узел соединения ригеля с колонной и узел соединения распорки с вертикальными связями по колоннам.

2. На примере изменения конструктивного решения узла примыкания ригелей и колонн, в данной работе, была продемонстрирована возможность отвода зоны упругопластической стадии работы материала от конструктивных сопряжений колонн и сварных швов соединения ригелей с колоннами.

3. На примере варианта конструктивного решения узла примыкания связей с пластическим элементом, был показан, способ повышения стойкости вертикальных связей по колоннам, так число связей, потерявших устойчивость в ходе численного анализа на контрольное землетрясение, уменьшилось на 37.5 %.

4. Установлено, что применение элементов энергопоглощения в рамно-связевых конструкциях каркаса здания позволяет сконцентрировать большую часть остаточных деформаций в них самих, тем самым снижает деформируемость других конструктивных элементов, повышая, живучесть здания и уменьшая объем восстановления, при реализации реального сейсмического воздействия. Позволяет стабилизировать работу каркаса здания, и с большей долей вероятности выдержать повторные толчки высокой интенсивности. При этом увеличение стоимости исполнения каркаса с энергопоглощающими элементами незначительно, по сравнению с традиционными способами повышения сейсмостойкости зданий и сооружений, таких как – увеличение сечений элементов, применение дополнительных элементов раскрепления каркаса и т.д. Следовательно, необходим дальнейший расчетно-экспериментальный анализ работы каркасов промышленных зданий с энергопоглощающими элементами, как перспективных решений для повышения их общей сейсмостойкости.

## References

1 SP 14.13330.2018. Seismic Building Design Code. <https://docs.cntd.ru/document/550565571>.

Belov, V.; Verkhovskiy, R.; Nikolaev, G.; Mikheev, S.

Seismic resilience frames of industrial buildings with energy absorbers;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10925. doi: 10.4123/CUBS.109.25



- 2 Decree of the Government of the Russian Federation No. 309 of 15.04.2014 "On approval of the State Program of the Russian Federation "Development of the North Caucasus Federal District" (as amended on September 29, 2023). <https://docs.cntd.ru/document/499091772>.
- 3 Decree of the Government of the Russian Federation No. 2464-p dated 24.09.2020 "On approval of the National Program of socio-economic development of the Far East for the period up to 2024". <https://docs.cntd.ru/document/565853199>.
- 4 Fastova, A.A. and Belov, V.V. (2021) Assessment of the radius of the zone of influence on foundations during the construction of thermal power plants in queues. *Industrial and civil engineering*, **7**, 58-69. [elibrary 46478896\\_58408181.pdf](https://elibrary.ru/46478896_58408181.pdf).
- 5 Belov, V.V. and Pergamenshchik, B.K. (2013) Large-scale accidents at thermal power plants (TPP) and their influence on equipment layouts inside main buildings. *Vestnik MGSU*, **4**, 61-69. <https://cyberleninka.ru/article/n/krupnye-avarii-na-tes-i-ih-vliyanie-na-komponovochnye-resheniya-glavnyh-korpusov-1>.
- 6 Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G., Dall'Asta, A., Luigi Di Sarno, Giaralis, A., Gutierrez-Urzúa, F., Malaga-Chuquitaype, C., Mitoulis, S.A., Petrone, C., Sextos, A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J. and Woo, G. (2021) Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **60**, 102267. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102267>.
- 7 Fang, C., Wang, W., Qiu, C., Hu, S., MacRae, G.A. and Eatherton M.R. (2022) Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, **191**, 107172. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107172>.
- 8 Esteghamati, M.Z. and Farzampour, A. (2020) Probabilistic seismic performance and loss evaluation of a multi-story steel building equipped with butterfly-shaped fuses. *Journal of Constructional Steel Research*, **172**, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106187>.
- 9 Li, S., Sun, C., Li, X., Tian, J. and Gao, D. (2021) Seismic design lateral force distribution based on inelastic state of K-eccentric brace frames combined with high strength steel. *Structures*, **29**, 1748-1762. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.046>.
- 10 Wang, J. and Li, B. (2022) Seismic fragility analysis of CFT frames with buckling-restrained braces and steel braces under long- and short-duration ground motions. *Structures*, **39**, 848-865. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.078>.
- 11 Pratap, M. and Vesmawala, G.R. (2023) The State-of-the-art review on development of replaceable fuse components in resilient moment resisting frame. *Structures*, **56**, 104888. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104888>.
- 12 Li, J. and Wang, W. (2022) Seismic design of low-rise steel building frames with self-centering hybrid damping connections. *Resilient Cities and Structures*, **1**, 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.06.002>.
- 13 Zheng, L., Dou, S., Wang, W., Ge, H., Gao, Y. and Han, Y. (2022) Seismic performance of braced frame with double round steel tube. *Journal of Constructional Steel Research*, **193**, 107297. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107297>.
- 14 Oh, S. and Park, H. (2022) Experimental study on seismic performance of steel slit damper under additional tensile load. *Journal of Building Engineering*, **50**, 104110. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104110>.
- 15 Jiang, Z., Yang, X., Zhang, A., Hua, X. and Chen, X. (2022) Design theory of earthquake-resilient prefabricated column foot joint with lateral force-resisting energy-consuming device. *Journal of Constructional Steel Research*, **198**, 107439. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107439>.
- 16 Rinaldin, G., Fasan, M., Sancin, L. and Amadio, C. (2020) On the behaviour of steel CBF for industrial buildings subjected to seismic sequences. *Structures*, **28**, 2175-2187. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.050>.
- 17 Bomben, L., Fasan, M. and Amadio, C. (2023) Assessment of the effect of seismic sequences on steel X-CBF for industrial buildings. *Procedia Structural Integrity*, **44**, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.014>.
- 18 Li, J., Wang, W. and Qu, B. (2020) Seismic design of low-rise steel building frames with self-centering panels and steel strip braces. *Engineering Structures*, **216**, 110730. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110730>.
- 19 SP 20.13330.2016. Loads and Actions. <https://docs.cntd.ru/document/456044318>.
- 20 SP 90.13330.2012. Thermal Power Stations. <https://docs.cntd.ru/document/1200095533>.
- 21 SP 16.13330.2017. Steel Structures. <https://docs.cntd.ru/document/456069588>.

Belov, V.; Verkhovskiy, R.; Nikolaev, G.; Mikheev, S.

Seismic resilience frames of industrial buildings with energy absorbers;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10925. doi: 10.4123/CUBS.109.25



- 22 Rigi, A., JavidSharifi, B., Hadianfard, M.A. and Yang, T.Y. (2021) Study of the seismic behavior of rigid and semi-rigid steel moment-resisting frames. *Journal of Constructional Steel Research*, **186**, 106910. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106910>.
- 23 Park, H.Y. and Oh, S.H. (2019) Design range of the damper of a T-stub damage-controlled system. *Journal of Constructional Steel Research*, **162**, 105719. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105719>.
- 24 Wang, M. and Ke, X. (2020) Seismic design of widening flange connection with fuses based on energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, **170**, 106076. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106076>.
- 25 Wang, M. and Bi, P. (2019) Study on seismic behavior and design method of dissipative bolted joint for steel frame with replaceable low yield point steel connected components. *Construction and Building Materials*, **198**, 677-695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.255>.
- 26 Wang, M., Zhang, C., Sun, Y. and Dong, K. (2022) Seismic performance of steel frame with replaceable low yield point steel connection components and the effect of structural fuses. *Journal of Building Engineering*, **47**, 103862. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103862>.
- 27 Lin, X., Li, H., He, L. and Zhang, L. (2022) Experimental study on seismic behavior of the damage-control steel plate fuses for beam-to-column connection. *Engineering Structures*, **270**, 114862. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114862>.
- 28 Chen, P., Pan, J., Hu, F. and Wang, Z. (2022) Numerical investigation on seismic resilient steel beam-to-column connections with replaceable buckling-restrained fuses. *Journal of Constructional Steel Research*, **199**, 107598. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107598>.
- 29 Ghadami, A., Pourmoosavi, Gh., Talatahari, S. and Azar, B.F. (2021) Overstrength factor of short low-yield-point steel shear links. *Thin-Walled Structures*, **161**, 107473. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107473>.
- 30 Park, H.Y., Kim, J. and Kuwahara, S. (2021) Cyclic behavior of shear-type hysteretic dampers with different cross-sectional shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, **187**, 106964. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106964>.
- 31 Tashakori, J., Razzaghi, J. and Ansari, S. (2019) Reassessment of current design criteria of plastic hinges in shear links. *Journal of Constructional Steel Research*, **158**, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.04.006>.
- 32 Yin, Z., Yang, B. and Zhang, X. (2022) Design of an eccentrically buckling-restrained braced steel frame with web-bolted replaceable links. *Journal of Constructional Steel Research*, **192**, 107250. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107250>.
- 33 Li, T., Su, M. and Guo, J. (2022) A plastic design method based on multi-objective performance for high-strength steel composite K-shaped eccentrically braced frame, *Journal of Constructional Steel Research*, **198**, 107562. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107562>.
- 34 Zhuang, L., Wang, J., Nie, X. and Wu, J. (2022) Experimental study on seismic behaviour of eccentrically braced composite frame with vertical LYP steel shear link. *Engineering Structures*, **255**, 113957. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113957>.
- 35 Wijaya, H., Rajeev, P., Gad, E., and Amirsardari, A. (2019) Effect of hysteretic steel damper uncertainty on seismic performance of steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, **157**, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.016>.
- 36 Nuzzo, I., Losanno, D., Caterino, N., Serino, G. and Rotondo, L.M.B. (2018) Experimental and analytical characterization of steel shear links for seismic energy dissipation. *Engineering Structures*, **172**, 405-418. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.005>.
- 37 SP 294.1325800.2017. The Construction of Steel. Design Rules. <https://docs.cntd.ru/document/456088764>.
- 38 Design and estimate manual for multistory buildings steel earthquake resistant frameworks. (for SNiP 2/03-04-2001 explanation), part 1. [https://studylib.ru/doc/2611263/posobie-po-raschetu-i-konstruirovaniyu-stal\\_nyh](https://studylib.ru/doc/2611263/posobie-po-raschetu-i-konstruirovaniyu-stal_nyh).
- 39 Tabatchikova T.I., Delgado Reina S.Y., Yakovleva I.L., Nosov A.D., Goncharov S.N., Gudnev N.Z. (2014) Structure and ductility of the heat-affected zone of welded joints of a high-strength steel. *The Physics of Metals and Metallography*, **115**, 1241-1248. <https://doi.org/10.1134/S0031918X14120072>.