

## Сравнительный анализ традиционных принципов проектирования рамных стальных сейсмостойких конструкций

*А.А. Бунов, Д.С. Сидоров, В.Б. Дорожнинский*

*Национальный исследовательский московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Описаны основные проблемы, связанные с принципами расчета и проектирования строительных конструкций зданий и сооружений в сейсмических активных районах в соответствии с положениями нормативного документа СП 14.13330.2018. Отмечены сложности, которые могут возникнуть при использовании зарубежных нормативных требований в части проектирования и расчета. Рассмотрен расчет плоской стальной многоэтажной рамы на основное и особое сочетание нагрузок и воздействий. Расчет рамы на особое сочетание выполнен по СП 14.13330.2018 с учетом и без учета дополнительных требований зарубежных норм проектирования ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22. Требования иностранных норм учитывались не в полном объеме, а только в части повышения надежности конструкции, по определенным позициям. Проанализировано изменение параметра металлоемкости рамы при различных вариантах расчетов. Сформулированы выводы и даны рекомендации путей снижения металлоемкости при расчете на сейсмическое воздействие с учетом повышения надежности строительных конструкций.

**Ключевые слова:** конечно-элементные схемы, колонны, ригели, сейсмическое воздействие, стальные рамные каркасы, плоские рамы, проектирование, предельные состояния, материалоемкость, оптимизация, надежность, особое сочетание, коэффициенты сочетаний.

При обосновании проектных решений инженеру необходимо руководствоваться нормативными документами, на основании которых будут выполняться требования механической безопасности (Федеральный закон "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" от 30.12.2009 N 384-ФЗ). Проектирование зданий и сооружений в сейсмических районах выполняется в соответствии с нормативным документом СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». В некоторых случаях при использовании данного документа возникают проблемы, связанные с отсутствием четких требований к расчету и проектированию строительных конструкций [1-3]. Таким образом, создаются сложности при выполнении требований механической безопасности.

Для подтверждения принятых проектных решений проектировщик может использовать иные документы [4-6], не противоречащие требованиям

СП 14.13330.2018, например, зарубежные нормы ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22.

Использование дополнительных требований и расчетных положений зачастую приводит к увеличению материалоемкости, а значит и стоимости объекта.

На примере стальной плоской рамы [7,8] выполним расчет основных несущих элементов по СП 14.13330.2018 с учетом и без учета требований ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22 в программном комплексе ЛИРА-САПР [9,10]. При этом, требования иностранных норм будем учитывать только в части повышения надежности конструкции. Также проанализируем изменение параметра металлоемкости.

Шаг колонн в плоскости рамы 6 м, количество шагов 3 шт. Рама семиэтажная, высота этажа 3 м. Шаг рам в продольном направлении 6 м, количество шагов 6 шт. Сопряжение колонн с балками – жесткое, сопряжение колонн с фундаментами – жесткое. Расчетная конечно-элементная схема рамы представлена на рис. 1.

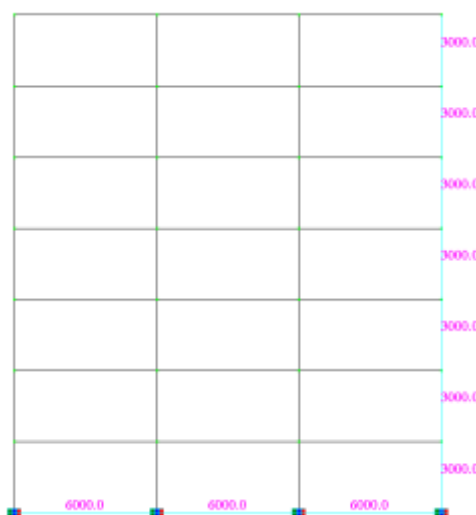


Рис. 1. – Расчетная конечно-элементная схема

Материал строительных конструкций – сталь С345.

Сбор нагрузок выполнен согласно таблице 1.

Таблица 1

Таблица принятых нагрузок на фундамент и покрытие

№ пп	Состав	Нормативная, т/м <sup>2</sup>	$\gamma_f$	Расчетная, т/м <sup>2</sup>
<b>Перекрытия</b>				
Постоянные нагрузки:				
1	Собственный вес	-	1,05	-
2	Нагрузка от конструкции пола	0,15	1,3	0,195
3	Нагрузка от ж/б плиты по профлисту	0,4	1,1	0,44
Временные (длительные) нагрузки:				
4	Нагрузка от перегородок	0,2	1,2	0,24
Временные (кратковременные) нагрузки:				
5	Полезная нагрузка:	0,2	1,2	0,24
	Всего:	0,95	-	1,115
<b>Покрытие</b>				
Постоянные нагрузки:				
1	Собственный вес	-	1,05	-
2	Нагрузка от кровли	0,15	1,3	0,195
3	Нагрузка от ж/б плиты по профлисту	0,4	1,1	0,44
Временные (кратковременные) нагрузки:				
4	Снеговая нагрузка - II район	0,100	1,4	0,140
	Всего:	0,650	-	0,775
<b>Иные нагрузки</b>				
1	Ветровое воздействие - III район	0,038	1,4	0,053
2	Сейсмическое воздействие - площадка 8 баллов	$2 \text{ м/с}^2$		

Расчет элементов рамы выполнялся на комбинации основного и особого сочетаний нагрузок (таблица 2).

Таблица 2

Расчетные сочетания нагрузок

Вид нагрузки	№ сочетания			
	1	2	3	4
	Основное сочетание по СП20.13330.2016	Особое сочетание по СП14.13330.2018	Особое сочетание по СП 14 с учетом ASCE/SEI 7-22	
колонны			балки	
Постоянные	1.0	0.9	0.9	0.9
Временные длительные	1.0	0.8	0.8	0.8
Временные кратковременные	1.0	0.5	0.5	0.5
Сейсмическая нагрузка	-	1.0	3.0	1.0

При расчете рамы на основное сочетание нагрузок №1 (таблица 2) были подобраны и проверены исходные сечения колонн и балок, удовлетворяющие критериям предельных состояний, а именно:

- сечение колонн средних – 30К3, крайних – 25К1;
- сечение балок – 40Б1.

Суммарная масса стальных элементов рамы при этом составила 14204 кг (7130кг – балки и 7074кг – колонны).

Схема с изображением процентов использования элементов рамы представлена на рис. 2.

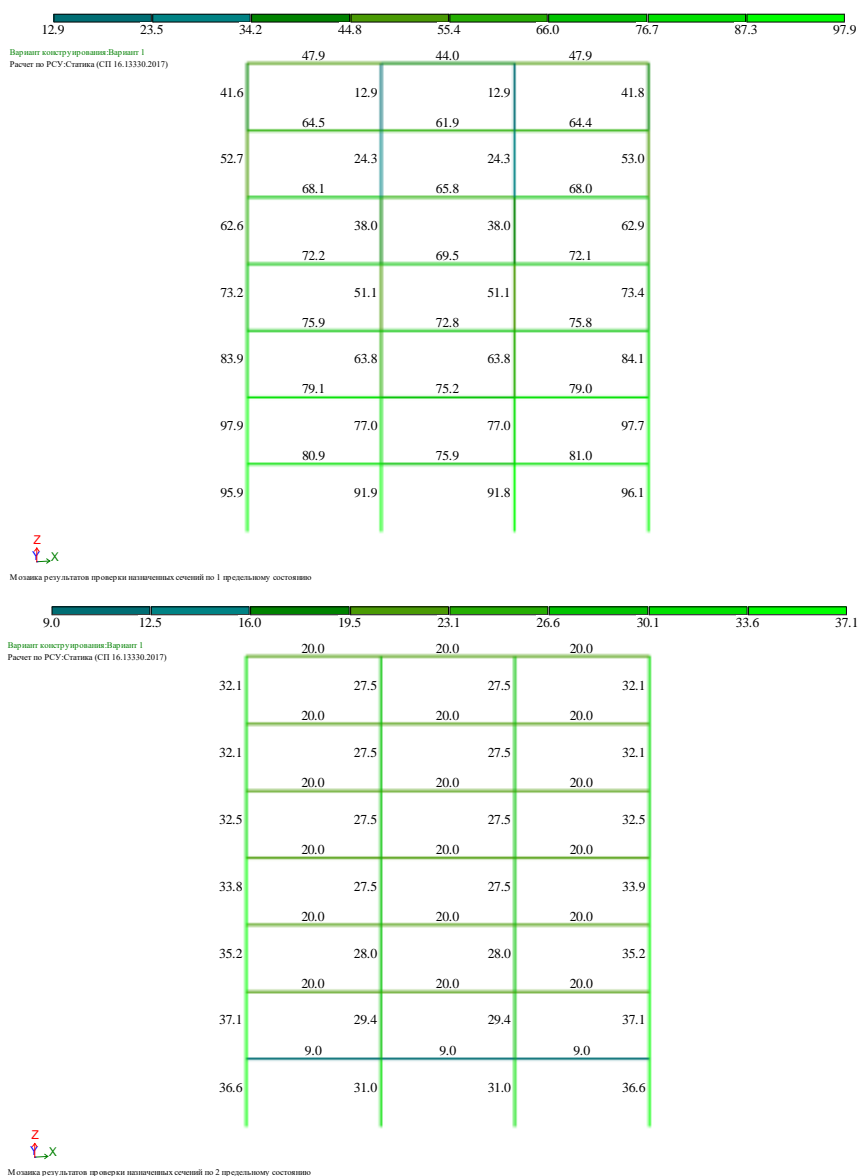


Рис. 2. – Изополя процентов использования элементов рамы по 1 и 2 предельным состояниям

Подобранные элементы рамы были проверены на нагрузки от сейсмического воздействия согласно расчетным требованиям СП14.13330.2018. При определении сейсмического воздействия были приняты следующие значения основных параметров:

$$K_0 = 1; K_1 = 0,25; K_\psi = 1,3.$$

При проверке прочности и устойчивости элементов дополнительно использовался коэффициент условия работы  $m_{gr}$ :

1,3 – при расчете по прочности; 1,2 – при расчете на устойчивость.

Расчет рамы выполнялся на особое сочетание нагрузок №2 (таблица 2).

Результаты проверки элементов рамы приведены на рис. 3.

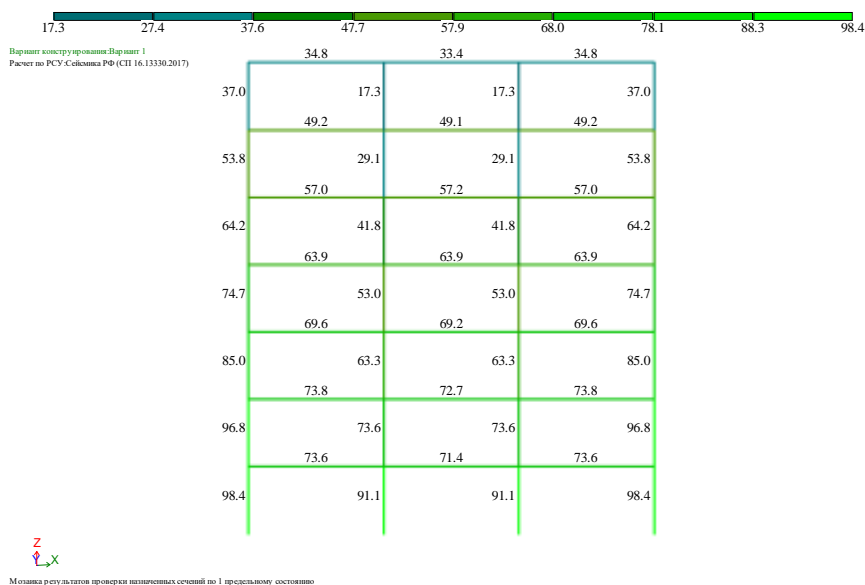


Рис. 3. – Изополя процентов использования элементов рамы по 1 группе предельных состояний

Как видно из результатов, сечения корректировке не подлежат. Суммарная масса стальных элементов рамы осталась прежней – 14204 кг (7130кг – балки и 7074кг – колонны).

На следующем этапе исследований был выполнен расчет рамы по СП 14.13330.2018 с учетом требований ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22.

Рассматриваемая рама, по классификации ANSI/AISC 341-22, может быть отнесена к обыкновенному рамному каркасу. В этом случае расчет элементов выполняется на особое сочетание нагрузок, включая сейсмическое воздействие, которое принимается с учетом дополнительных коэффициентов  $\Omega = 3$  – при расчете колонн и  $\Omega = 1$  – при расчете балок. Данные коэффициенты учтены при формировании расчетных сочетаний нагрузок №3 и 4 (таблица 2). При определении сейсмического воздействия были приняты следующие значения основных параметров:

$$K_0 = 1; K_1 = 0,286; K_\psi = 1,3.$$

При проверке прочности и устойчивости элементов дополнительный коэффициент условия работы  $m_{cr}$  принимался:

1,2 – при расчете по прочности; 1,2 – при расчете на устойчивость.

Результаты проверки элементов рамы приведены на рис. 4.

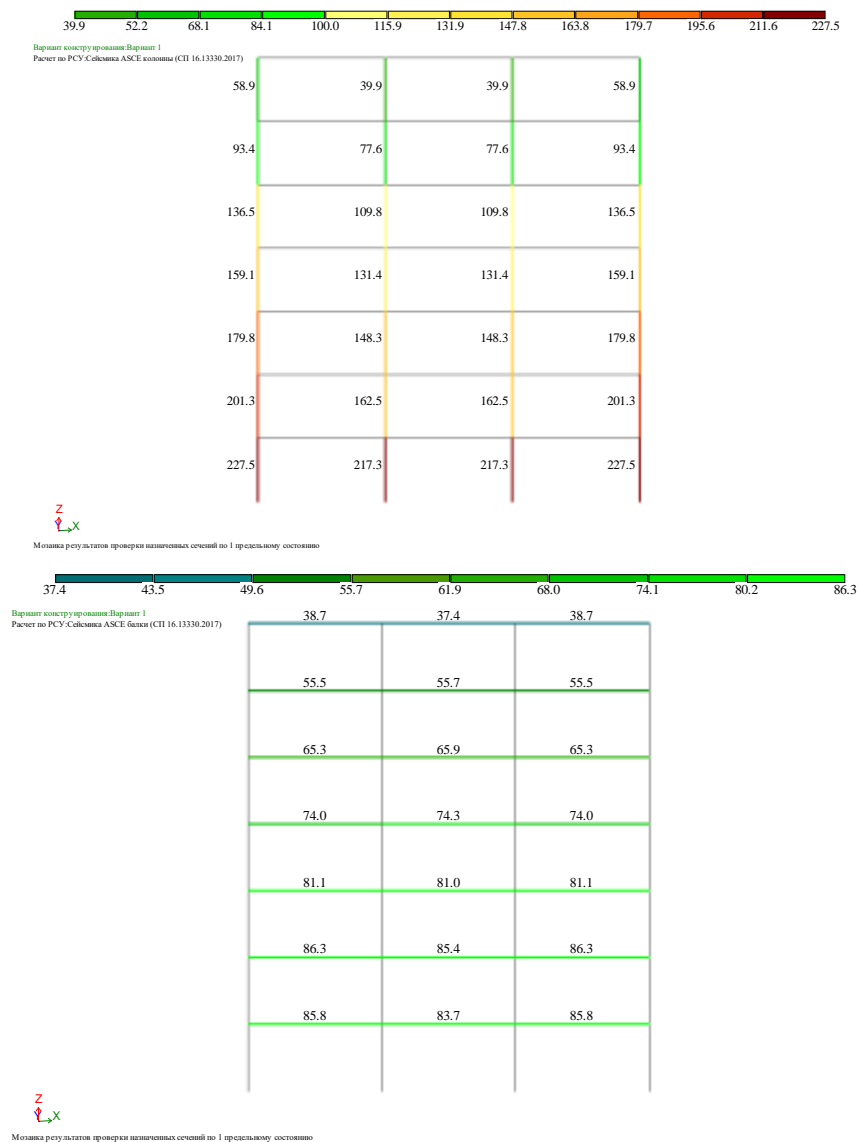


Рис. 4. – Изополя процентов использования колонн и балок по 1 группе предельных состояний

Как видно из результатов, сечения колонн требуют корректировки. Сечения балок можно оставить без изменений.

По результатам подбора сечений колонны были получены следующие профили:

- сечение колонн средних – 40К4, крайних – 40К2.

Результаты проверки скорректированных элементов рамы приведены на рис. 5.

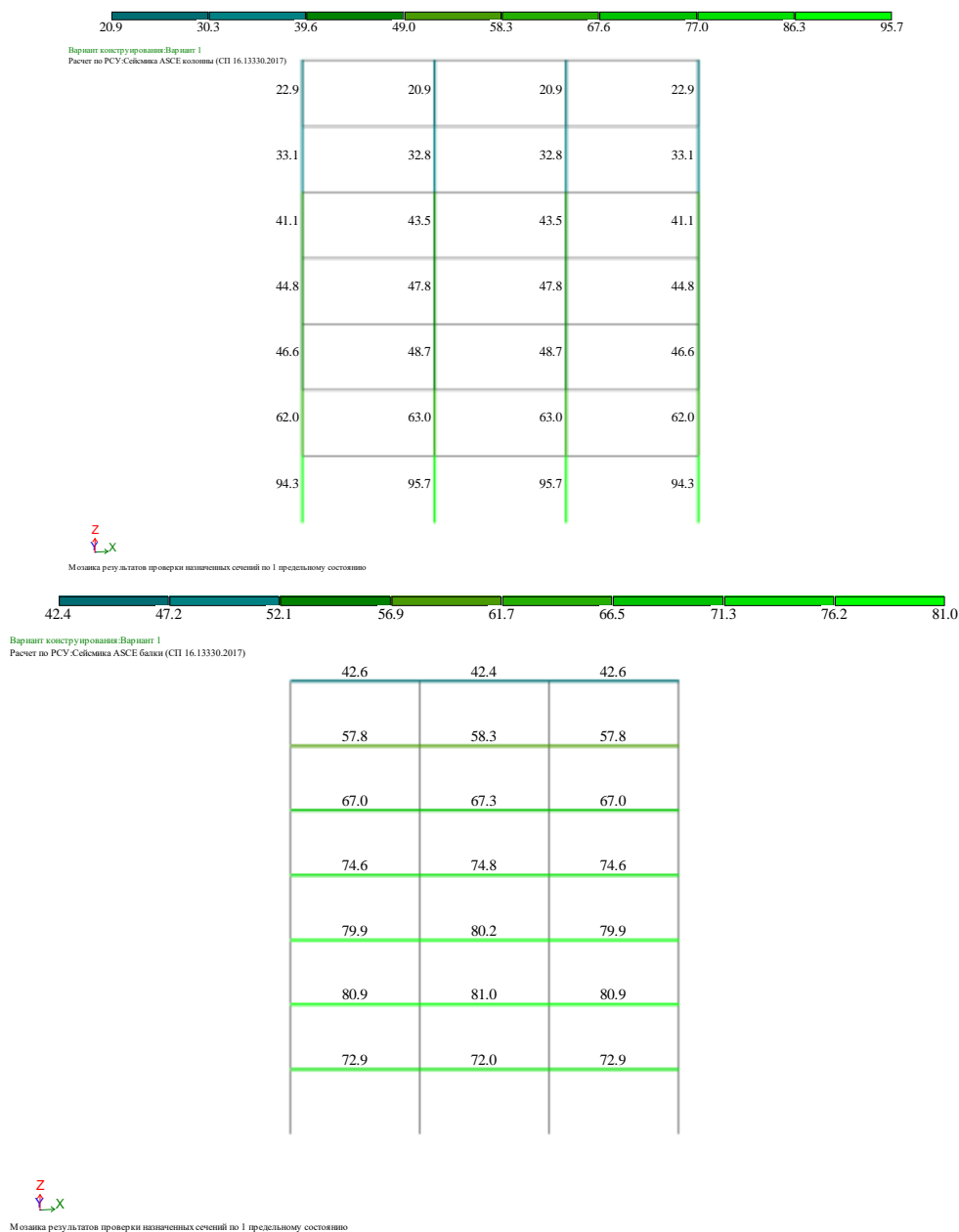


Рис. 5. – Изополя процентов использования колонн и балок по 1 группе предельных состояний



Суммарная масса стальных элементов рамы при этом составила 24083 кг (7130кг – балки и 16953кг – колонны), что на 69,5% больше, чем при расчете без учета требований ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22.

Стоит отметить, что в данном случае рассматривался вариант без изменения сечения колонн по высоте рамы, хотя по результатам проверки колонн (рис. 5) наблюдается резкое снижение процента использования сечения. При проверке колонн на сейсмическое воздействие по требованиям СП14.13330.2018 (рис. 3) такого резкого снижения не наблюдается.

Выполним оптимизацию сечений колонн по высоте рамы и оценим эффективность этого решения. Для средних колонн 1 и 2 этажей примем 40К4, далее 35К2. Для крайних колонн 1 и 2 этажей примем 40К2, далее 30К4. Результаты проверки оптимизированных сечений колонн приведены на рис. 6.

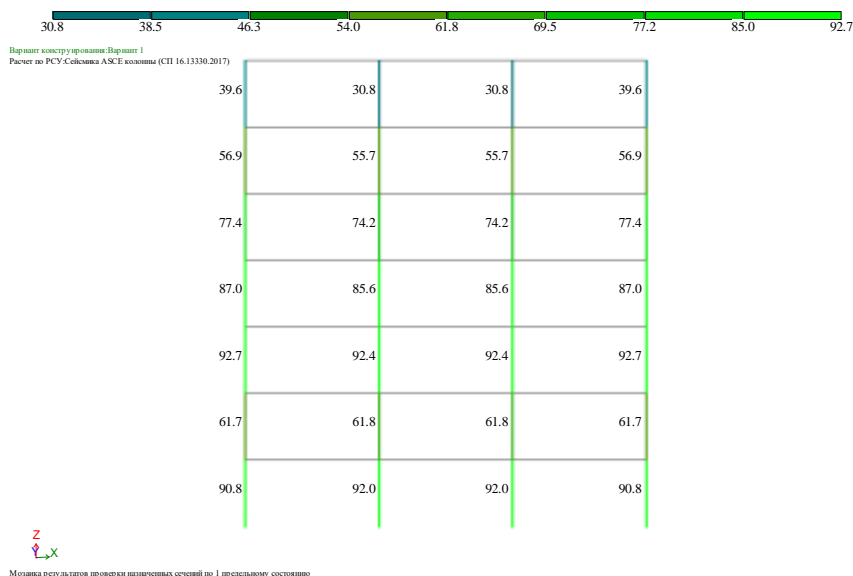


Рис. 6. – Изополя процентов использования колонн по 1 группе предельных состояний

Суммарная масса стальных элементов рамы при этом составила 19244 кг (7130кг – балки и 12114кг – колонны), что на 35,5% больше, чем при расчете без учета требований ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22.

При этом распределение процентов использования (рис. 6) имеет хорошее совпадение с процентами использования при расчете рамы на сейсмическое воздействие по СП14.13330.2018 (рис. 3). При большей оптимизации сечений колонн по высоте можно добиться увеличения материалоемкости рамы на величину 30%.

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Сравнительный анализ норм проектирования [4] и анализ результатов расчетов стальной рамы, представленный в данной статье, выявили недостаток несущей способности колонн рамы при расчете по СП14.13330.2018.

2. Для повышения надежности элементов стальной рамы рекомендуется использовать материалы из иностранных нормативных документов (ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22), при условии, что они не противоречат действующим нормам на территории Российской Федерации (СП14.13330.2018).

3. Использование в расчетах на сейсмическое воздействие требований ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22 приводит к увеличению материалоемкости конструкции стальной рамы на величину не менее 30%.

4. При проектировании стальной рамы с учетом требований ASCE/SEI 7-22, ANSI/AISC 341-22 снижать материалоемкость возможно путем изменения сечений элементов по высоте.

### Литература

1. Richards P.W. and Oh S.S. «Cyclic Behavior of Replaceable Shear Fuse Connections for Steel Moment Frames» // Journal of Structural Engineering. 2019, ASCE, Vol. 145, No. 12, P. 1,940–1,951.



2. Wu T.Y., El-Tawil S. and McCormick J. «Highly Ductile Limits for Deep Steel Columns» // Journal of Structural Engineering. 2018, ASCE, Vol. 144, No. 4, P. 04018016-1–04018016-13.

3. Белов М.В., Раевский А.Н. Скрытые и явные пластические шарниры статически неопределимых стержневых систем в предельном состоянии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. №3. URL: [cyberleninka.ru/article/n/skrytye-i-yavnye-plasticheskie-sharniry-staticheski-neopredelimiyyh-sterzhnevyh-sistem-v-predelnom-sostoyanii](http://cyberleninka.ru/article/n/skrytye-i-yavnye-plasticheskie-sharniry-staticheski-neopredelimiyyh-sterzhnevyh-sistem-v-predelnom-sostoyanii).

4. Бунов А.А., Сидоров Д.С. Традиционные принципы проектирования рамных стальных сейсмостойких конструкций // Инженерный вестник Дона. 2024. №4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_51\\_\\_4y24\\_Bunov\\_Sidorov.pdf\\_10b1c89e7e.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_51__4y24_Bunov_Sidorov.pdf_10b1c89e7e.pdf)

5. Востров В.К. Вопросы критики и дальнейшего развития национальной нормативной базы по расчету сооружений на сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2024. № 1. С. 65-89. DOI 10.37153/2618-9283-2024-1-65-89.

6. Сердюк Е.А. Особенности расчета зданий на сейсмические воздействия по различным нормам проектирования (на примере стального каркаса промздания) // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4. С. 117-120.

7. Pryor S.E. and Murray T.M. «Next Generation Partial Strength Steel Moment Frames for Seismic Resistance» // Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction, Proceedings of the First Australia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference, Perth, Australia. 2013, P. 27–32.

8. Annisi Rabie & Solman, Jalal & Fathalla Ibtisam. Seismic Analysis of Typical Steel Frame Building // International Journal of Engineering Science. 2022. №1. URL:

---



researchgate.net/publication/366596886\_Seismic\_Analysis\_of\_Typical\_Steel\_Frame\_Building.

9. Зотова Е.В., Панасюк Л.Н. Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульсные воздействия // Инженерный вестник Дона. 2012. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933.

10. Петров В.Ю. Методика расчета сооружений на максимальное расчетное землетрясение в программном комплексе ЛИРА-САПР 2019 // Инженерный вестник Дона. 2019. № 7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\_38\_\_7y2019\_Petrov\_Barmin\_Gabova.pdf\_136c41b546.pdf

### References

1. Richards P.W., Oh S.S. Journal of Structural Engineering. 2019, ASCE, Vol. 145, No. 12, pp. 1,940–1,951.

2. Wu T.Y., El-Tawil S. and McCormick J. Journal of Structural Engineering. 2018, ASCE, Vol. 144, No. 4, P. 04018016-1–04018016-13.

3. Belov M.V., Raevskij A.N. Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2007. №3. URL: cyberleninka.ru/article/n/skrytye-i-yavnye-plasticheskie-sharniry-staticheski-neopredelimyh-sterzhnevyyh-sistem-v-predelnom-sostoyanii.

4. Bunov A.A., Sidorov D.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\_51\_\_4y24\_Bunov\_Sidorov.pdf\_10b1c89e7e.pdf

5. Vostrov V.K. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2024. No. 1. pp. 65-89. DOI 10.37153/2618-9283-2024-1-65-89.

6. Serdyuk E.A. Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury. 2019. № 4. pp. 117-120.

7. Pryor S.E. and Murray T.M. Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction, Proceedings of the First Australia and

---



South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference, Perth, Australia. 2013, pp. 27–32.

8. Amnisi Rabie & Solman, Jalal & Fathalla Ibtisam. International Journal of Engineering Science. 2022. No. 1. URL: [researchgate.net/publication/366596886\\_Seismic\\_Analysis\\_of\\_Typical\\_Steel\\_Frame\\_Building](https://researchgate.net/publication/366596886_Seismic_Analysis_of_Typical_Steel_Frame_Building).

9. Zotova E.V., Panasyuk L.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933).

10. Petrov V.YU. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 7. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_38\\_\\_7y2019\\_Petrov\\_Barmin\\_Gabova.pdf\\_136c41b546.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_38__7y2019_Petrov_Barmin_Gabova.pdf_136c41b546.pdf)

**Дата поступления: 26.08.2024**

**Дата публикации: 28.09.2024**