Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2023, Том 15, № 1 / 2023, Vol. 15, Iss. 1 https://esj.today/issue-1-2023.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/68SAVN123.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:
Алексеева, А. С. Экспериментальное исследование фланцевого узла стального каркаса многоэтажного здания при сейсмическом воздействии / А. С. Алексеева, Н. А. Бузало, И. Д. Платонова // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 1. — URL: https://esj.today/PDF/68SAVN123.pdf

For citation:
Alekseeva A.S., Buzalo N.A., Platonova I.D. Experimental research multi-storey buildings steel frame flange joints under seismic impact. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(1): 68SAVN123. Available at: https://esj.today/PDF/68SAVN123.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

Алексеева Анастасия Сергеевна
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», Новочеркасск, Россия
Ассистент
E-mail: nastja3post@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8541-2586
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1170792
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193738963

Бузало Нина Александровна
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», Новочеркасск, Россия
Профессор
Кандидат технических наук, профессор
E-mail: buzalo_n@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6204-0214
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190964121

Платонова Ирина Дмитриевна
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», Новочеркасск, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: irinplatonova@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7758-7119
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAD-5749-2021
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57214067914

Экспериментальное исследование фланцевого узла стального каркаса многоэтажного здания при сейсмическом воздействии

Аннотация. В ближайшие годы в нашей стране прогнозируется расширение применения стальных каркасов при строительстве многоэтажных жилых зданий, особенно в сейсмоопасных районах. Массовое использование стали для каркасов гражданских зданий выдвигает на первый план проблемы снижения материалоемкости элементов и узлов каркасов, разработки новых эффективных конструктивных решений, позволяющих оптимально использовать их несущую способность. Одновременно должны решаться задачи повышения надежности и долговечности сооружений, что возможно только при условии применения при проектировании верифицированных расчетных моделей. В рамках диссертационного

исследования одного из авторов изучалась работа фланцевых узлов многоэтажных стальных каркасов гражданских зданий при сейсмических нагрузках. Была создана конечно-элементная модель узла, для уточнения напряженно-деформированного состояния которой и изучения характера действующих нагрузок, выполнены экспериментальные исследования. При проектировании сейсмостойких зданий необходимо учитывать, что при землетрясениях отдельные несущие конструкции и их узлы получают повреждения, при этом сама система изменяет свои амплитудно-частотные характеристики, диссипативные, прочностные и жесткостные свойства во времени. Для численного интегрирования уравнений движения и экспериментальных исследований фланцевого узла стального каркаса необходимо задаться средними значениями частот колебаний. По имеющимся в открытой печати инструментальным записям ускорений основания при реальных землетрясениях были построены графики амплитуд ускорений, получены после обработки массивов данных амплитудно-частотные характеристики, отмечены преобладающие частоты и соответствующие им амплитуды ускорений. Динамические испытания образцов проводились на гидроэлектрическом сейсмостенде. Было выявлено появление пластических деформаций в некоторых элементах и соединениях, которые не приводят к разрушению узла в целом. Результаты экспериментальных и численных исследований дают представление о реальной физической модели деформирования и разрушения конструкции, позволяют обоснованно выбирать пределы идеализации расчетной модели, создавать цифровую модель в соответствии с реальной физической моделью работы конструкции в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: фланцевые узлы многоэтажных стальных каркасов гражданских зданий; сейсмические воздействия; экспериментальные исследования; амплитудно-частотные характеристики

Введение

К очевидным экономическим и технологическим преимуществам применения стальных каркасов в жилом многоэтажном строительстве по сравнению с каркасами из монолитного железобетона относят высокую технологичность изготовления несущих элементов каркаса, обусловленную автоматизацией производства на заводах металлических конструкций, возможность доставки элементов каркаса заводского изготовления в отдаленные районы, высокую устойчивость к повреждениям и ударным воздействиям при сейсмических нагрузках и низких температурах [1].

Перечисленные преимущества объясняют массовое применение стальных каркасов при строительстве многоэтажных жилых зданий, особенно в сейсмоопасных районах [2], во многих странах мира (рис. 1) и прогнозируют рост применения стальных каркасов в городском гражданском строительстве в нашей стране.

Снижение материалоемкости конструкций и узлов стальных каркасов многоэтажных зданий возможно при использовании сталей повышенной прочности, разработке новых эффективных конструктивных форм, позволяющих оптимально использовать несущую способность элементов и узлов [3].

Однако применение материалов повышенной прочности и внедрение методов оптимального проектирования не приводит автоматически к повышению надежности или долговечности сооружения, если при этом при проектировании не применяются верифицированные расчетные модели. Так, применение в конструкциях высокопрочной стали без учета снижения пластичности и особенностей деформирования и разрушения в зонах концентрации напряжений при динамических нагрузках приводит к увеличению вероятности квазихрупкого разрушения элементов и узлов их соединения [4].

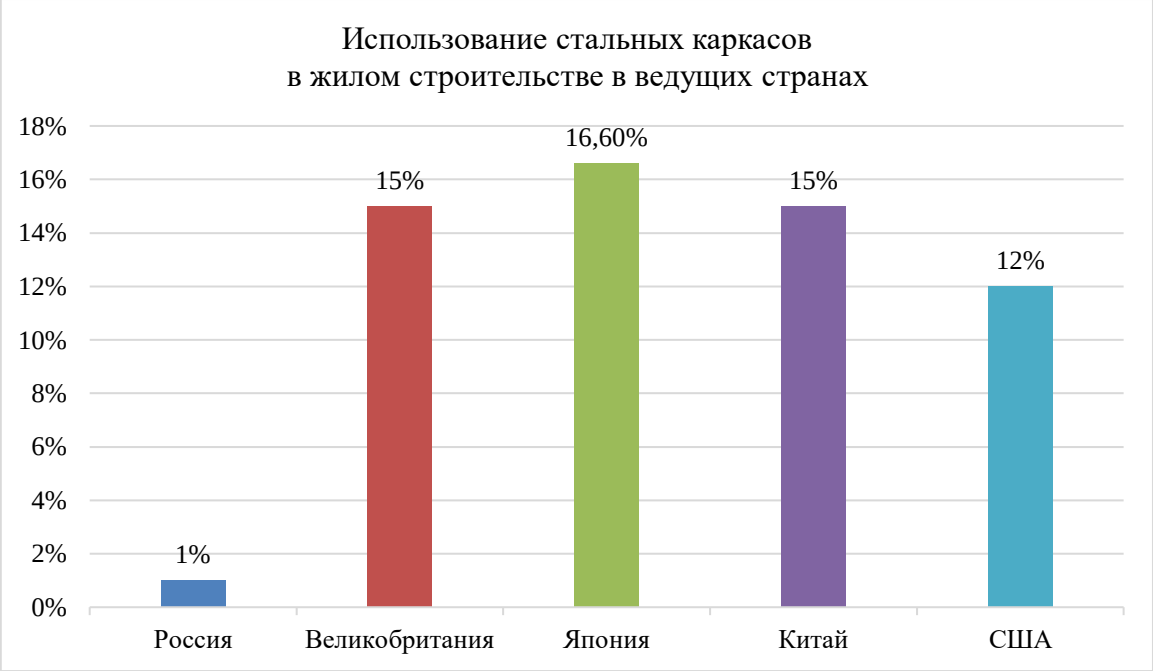


Рисунок 1. *Использование стальных каркасов в жилищном строительстве (рисунок авторов)*

Поэтому мероприятия по снижению материалоемкости стальных каркасов должны сопровождаться повышением надежности элементов и их соединений, а это возможно, если последовательно верифицируются и уточняются их расчетные модели.

Методы исследования

Целью данного исследования являлось изучение работы рамных узлов многоэтажных стальных каркасов гражданских зданий при сейсмических нагрузках. При проектировании сейсмостойких каркасных зданий необходимо учитывать, что при землетрясениях отдельные несущие конструкции и их узлы получают повреждения, при этом сама система меняет свои амплитудно-частотные характеристики, диссипативные, прочностные и жесткостные свойства во времени, т.е. напряжённо-деформированное состояние (НДС) каждой следующей итерации зависит от предыдущего состояния системы несущих конструкций [5]. Современная теория сейсмостойкости предлагает два основных метода расчета на сейсмические воздействия: спектральный метод и прямой динамический. Прямой динамический подход нашёл реализацию в универсальных программных комплексах, реализующих метод конечных элементов МКЭ (ANSYS, Abaqus и другие) в виде прямых нелинейных динамических расчётов с использованием современных знаний о нелинейной работе материала. Применение этих комплексов позволяет достаточно детально оценить напряжённо-деформированное состояние элементов и узлов каркаса здания при сейсмическом воздействии высокой интенсивности вплоть до их разрушения [6].

Альтернативой прямого динамического метода является Pushover Analysis — статическая процедура, в которой используется упрощенный нелинейный метод для оценки сейсмических структурных деформаций. По мере того, как отдельные компоненты конструкции разрушаются или выходят из строя, динамические силы, воздействующие на здание, переносятся на другие компоненты. Pushover Analysis имитирует это явление, применяя нагрузки до тех пор, пока не будет найдено «слабое звено» конструкции. Затем модель пересматривается с учетом изменений в конструкции, вызванных «слабым звеном». Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет определен характер пластических деформаций

всей конструкции при сейсмической нагрузке [7]. Данный метод позволяет оценить поведение конструкции при сейсмических воздействиях за пределами упругих деформаций, связывает несущую способность, представленную в виде зависимости перемещений верхних элементов здания от силы сдвига у основания, с сейсмическим требованием, представленным в виде спектра реакции.

В рамках диссертационного исследования одного из авторов статьи изучалась работа фланцевых узлов многоэтажных стальных каркасов гражданских зданий при сейсмических нагрузках. Для уточнения напряженно-деформированного состояния узла и изучения характера действующих нагрузок в программном комплексе ANSYS была создана конечно-элементная модель исследуемого узла, выполненная в виде твердотельной трёхмерной модели (рис. 2). Сварные швы представлены в виде отдельных геометрических тел. Такое решение принято для упрощения процесса построения сетки объёмных конечных элементов. Колонна и ригели ограничены длиной в три высоты сечения. Это также сделано для упрощения расчётной схемы, уменьшения требуемых ресурсов и сокращения времени расчёта [8].

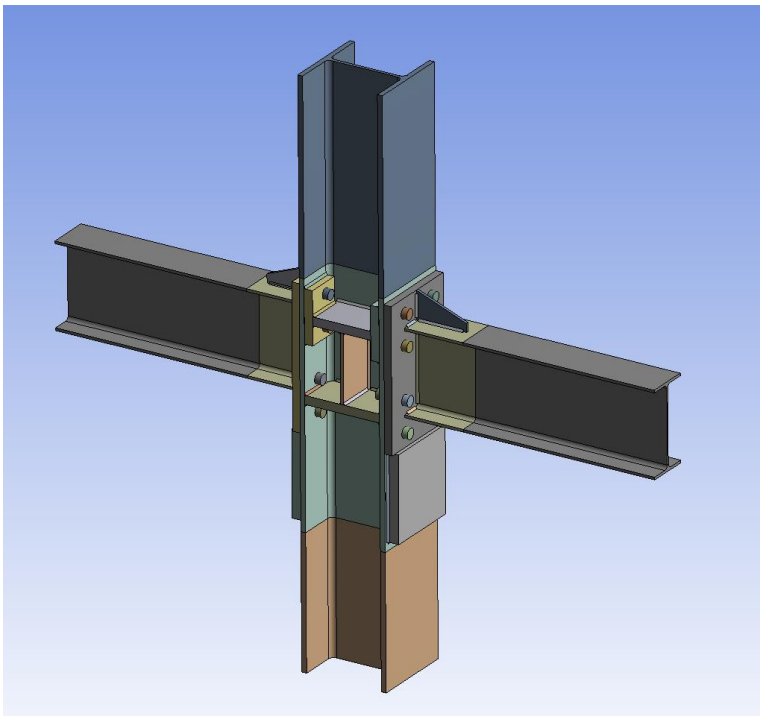


Рисунок 2. *Расчётная модель узла (рисунок авторов)*

Результаты исследования

В результате анализа было найдено пиковое значение напряжений в 392 МПа (что превышает предел текучести стали С345) в зоне соединения ригеля с фланцем [9], а именно в нижнем горизонтальном шве (рис. 3). Это подтверждает закономерность, подчеркнутую Е.И. Беленя [10] о нарушении закона Журавского о распределении касательных напряжений по высоте опорного сечения балки и возможности появления местных пластических деформаций. Концентрация напряжений фиксируется в нижней части стенки, причем степень концентрации зависит от соотношения толщин стенки и площади поперечного сечения фланца.

Уточнение расчетной модели конструкции базируется на результатах экспериментальных исследований, изучении действительной работы конструкций и характера действующих нагрузок [11]. Результаты экспериментальных и натурных исследований дают представление о реальной физической модели деформирования и разрушения конструкции,

позволяют обоснованно выбирать пределы идеализации расчетной модели, создавать цифровую модель в соответствии с реальной физической моделью работы конструкции в условиях эксплуатации [12].

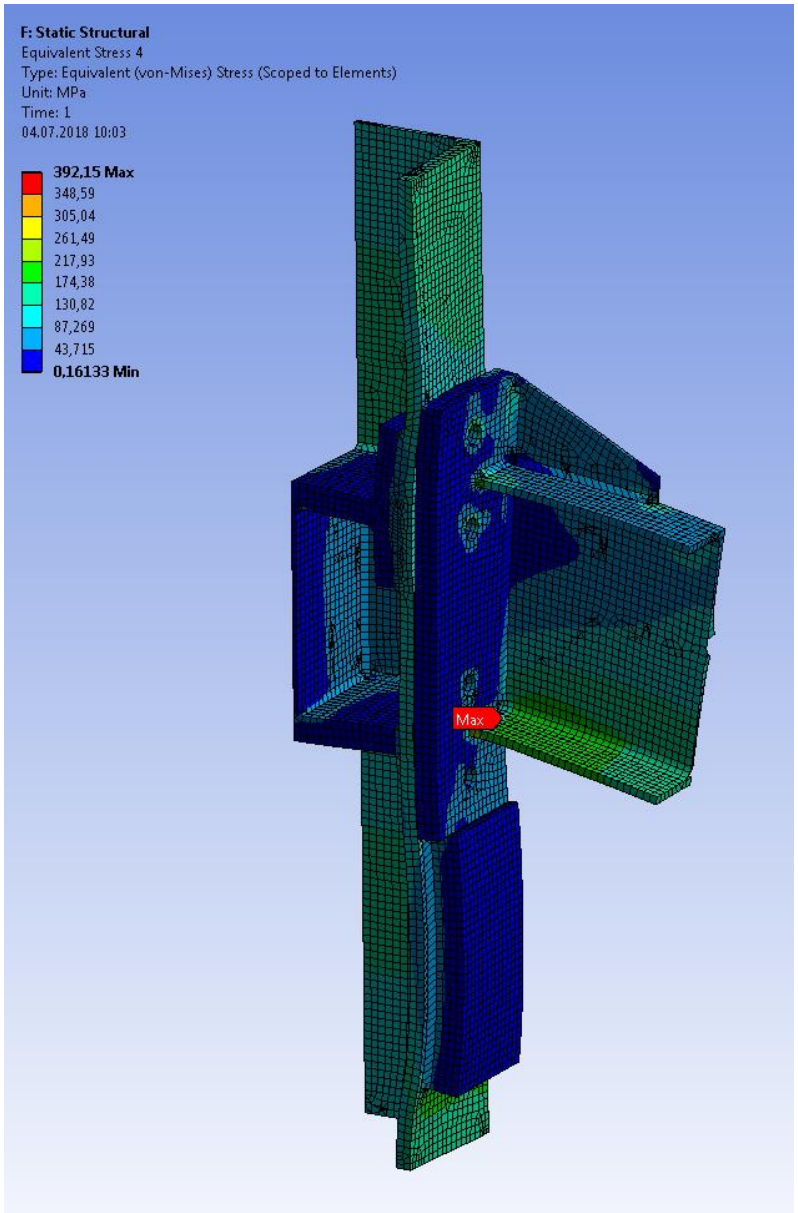


Рисунок 3. *Напряжённо-деформированное состояние исследуемого узла (рисунок авторов)*

С целью совершенствования методики компьютерного КЭ-моделирования фланцевых узлов стальных каркасов при сейсмических воздействиях необходимо экспериментально изучить работу образцов таких узлов при периодической нагрузке. Для этого требуется определить фактическое распределение напряжений в установленных зонах исследуемых образцов, в частности, в околошовной зоне в месте сопряжения ригеля с колонной; определить перемещения в установленных точках исследуемых образцов; сопоставить данные эксперимента с результатами анализа КЭ-модели. Изготовленные образцы представляют собой фрагмент рамного узла стального каркаса здания в месте примыкания горизонтальной балки к колонне. Колонна и балка выполнены из горячекатанных двутавров с параллельными гранями полок № 12Б1 по ГОСТ Р 57837-2017, сталь марки Ст3сп. Экспериментальные модели были изготовлены в заводских условиях по разработанным авторами чертежам (рис. 4, 5).

Механизированная сварка производилась сварочной проволокой Св08-Г2С. Фланцевое соединение выполнено болтами М10.

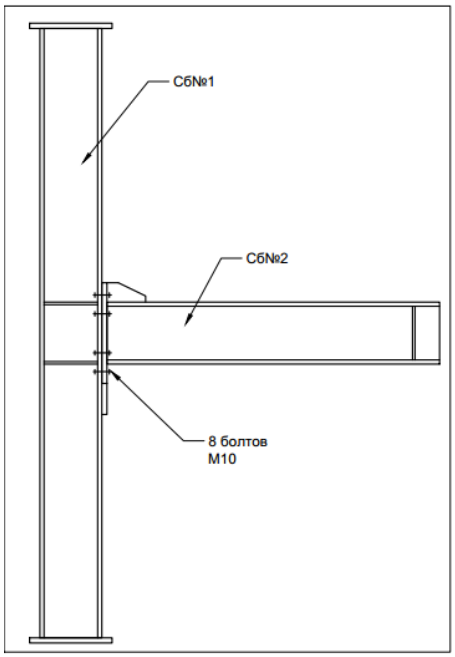


Рисунок 4. *Сборочный чертеж экспериментальной модели фланцевого узла (рисунок авторов)*

Все образцы имеют длину стойки 1200 мм, длину ригеля 800 мм. По торцам колонны приварены квадратные пластины толщиной 8 мм для возможности установки образца в кондукторы. Отмечено удовлетворительное качество сварных швов, соединяющих фланец и ребра с ригелем, горизонтальных диафрагм со стенкой и полками колонны

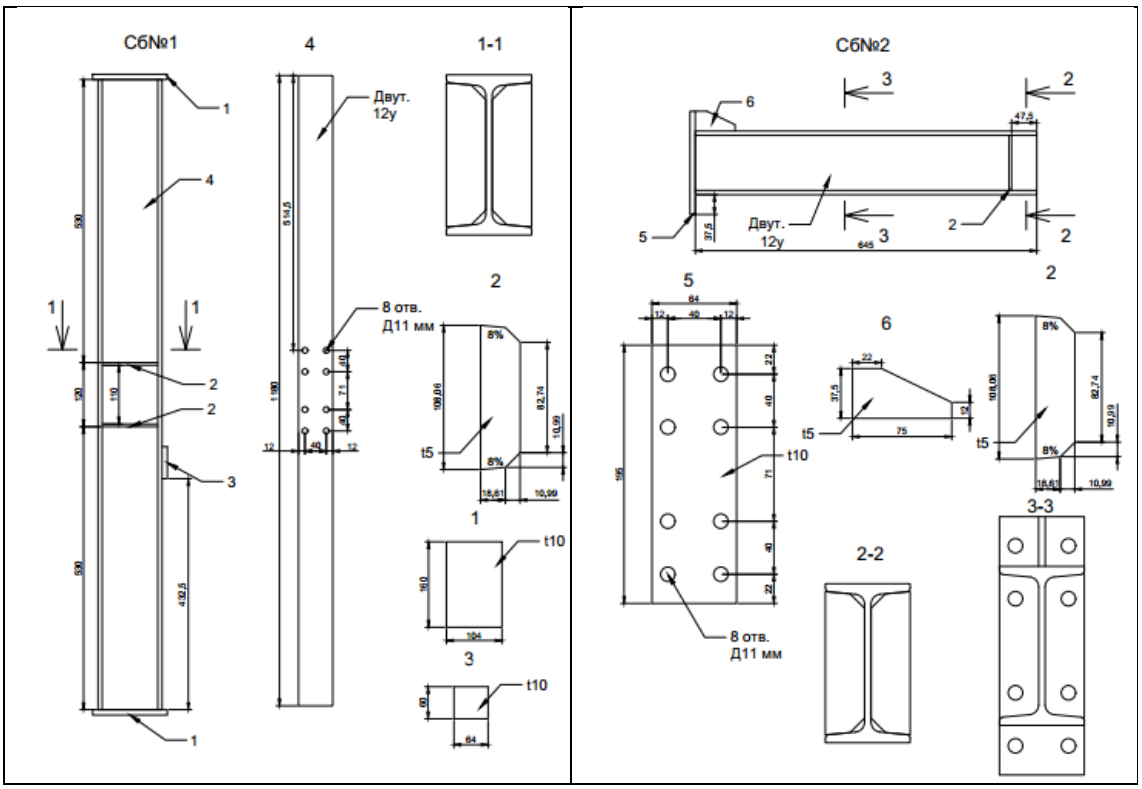


Рисунок 5. *Деталировочные чертежи элементов узла (рисунок авторов)*

Для проведения экспериментальной части исследования необходимо задать частоту колебания конструкции. По имеющимся в открытой печати инструментальным записям ускорений основания при реальных землетрясениях, были построены графики амплитуд ускорений (рис. 6). После обработки массивов данных в программе для численного анализа данных и научной графики OriginPro [13] получены графики амплитудно-частотных характеристик, на которых отмечены преобладающие частоты и соответствующие им амплитуды ускорений (рис. 7).

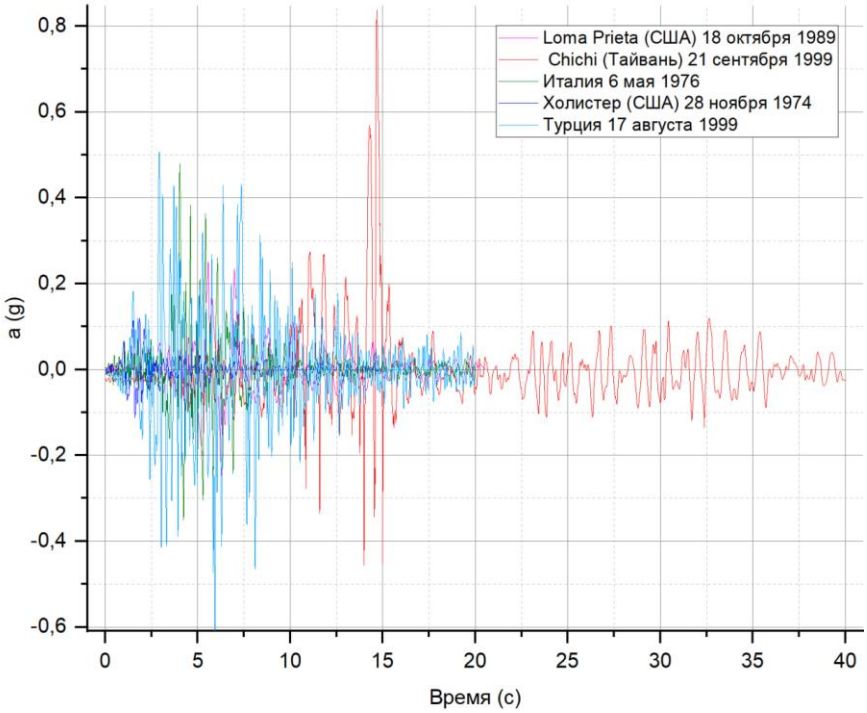


Рисунок 6. *Амплитуды линейных ускорений (рисунок авторов)*

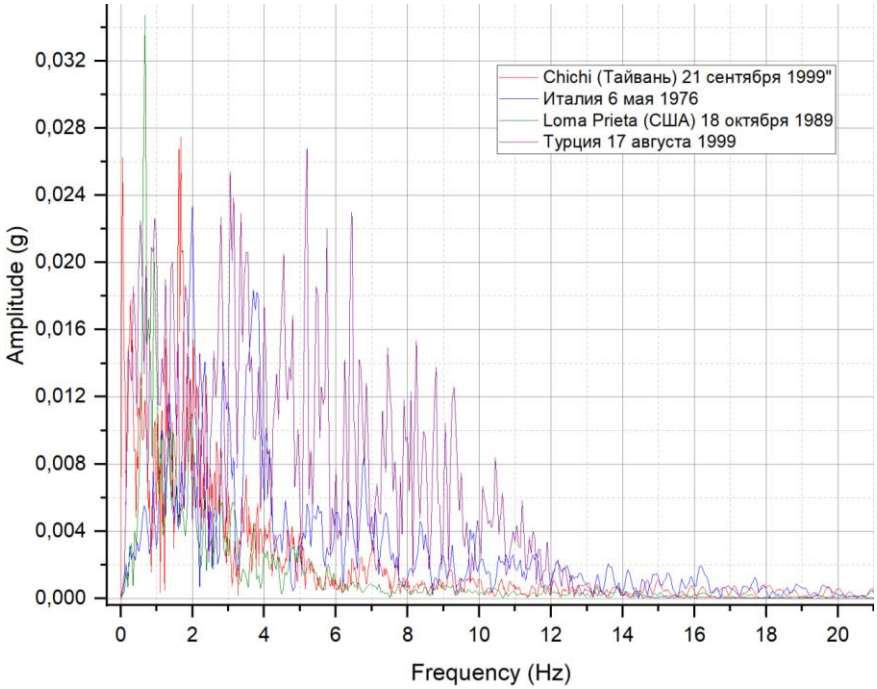
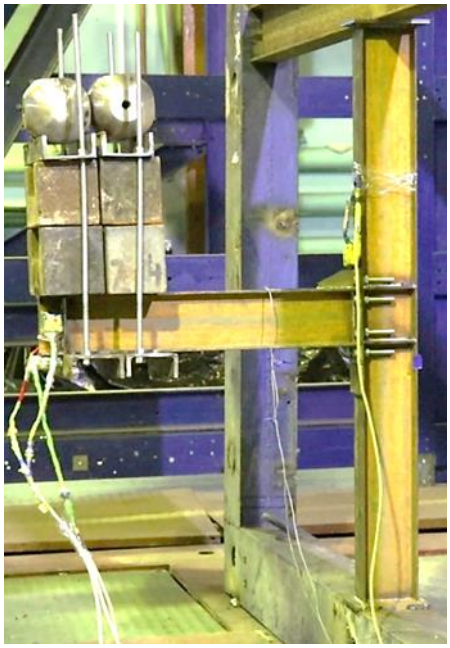


Рисунок 7. *Амплитудно-частотные характеристики землетрясений в различных регионах (рисунок авторов)*

На рисунках 6 и 7 ускорения представлены в виде гравитационной единицы — перегрузки, которая определяется как отношение ускорения к ускорению свободного падения a(g) = a/g, где g = 9.81 м/с^2 (речь идет об амплитудных (пиковых) значениях). Для численного интегрирования уравнений движения и экспериментальных исследований достаточно задаться средними значениями частот.

Динамические испытания образцов проводились на гидроэлектрическом сейсмостенде ВП-100. Сейсмостенд состоит из сейсмоплатформы инерционного действия ВП-100 и пульта управления испытательного стенда (ПУИС) ВП-100 (рис. 8).



a

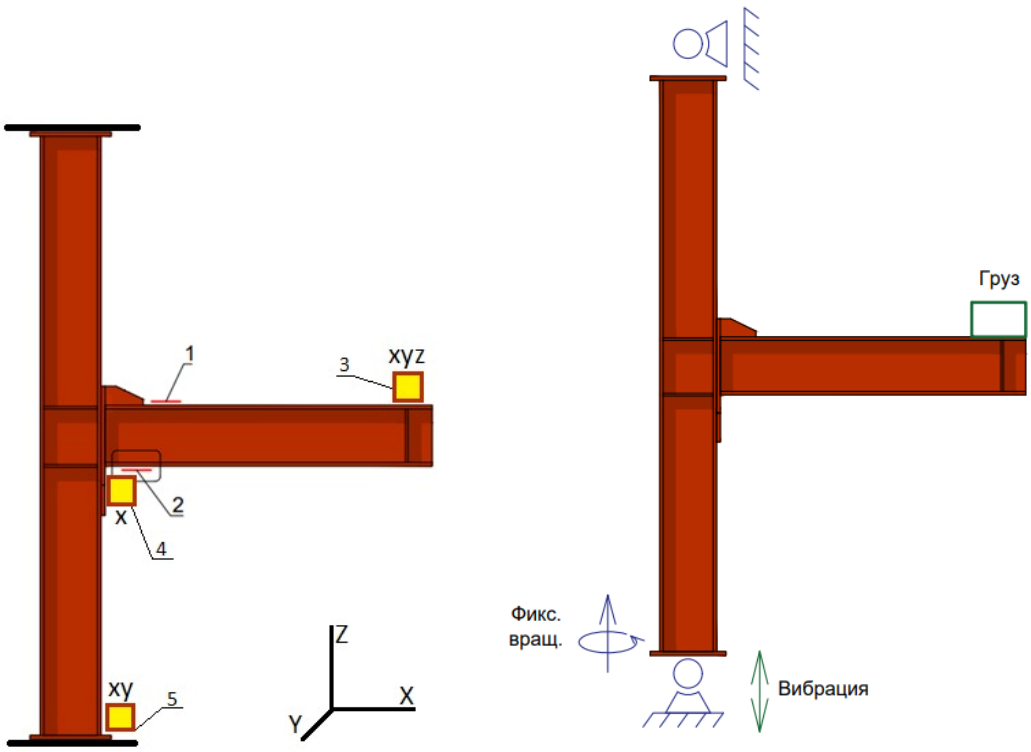
b

Рисунок 8. *Сейсмостенд ВП-100: a — платформа инерционного действия ВП-100; b — ПУИС ВП-100 (фото авторов)*

Сейсмоплатформа ВП-100 является гидроэлектрическим устройством, создающим возвратно-поступательные перемещения платформы с частотой от 0,5 до 33 Гц и амплитудой перемещения в горизонтальной плоскости в диапазоне от 0 до 15 мм с ускорением до 4g. Габаритные размеры сейсмоплатформы составляют 4×6 м, грузоподъемность — 100 тонн. В основу механизма перемещения платформы ВП-100 положены асинхронные двигатели, управляемые частотными преобразователями, которые воздействуют на силовые гидравлические агрегаты, создающие колебания, воздействующие на испытуемый объект.

Пульт управления испытательного стенда (ПУИС) ВП-100 предназначен для работы в составе оборудования пульсаторов виброплатформы. Управление стенда ВП-100 — сенсорное с пульта управления. Система изменения частоты и система изменения амплитуды — две независимые системы. Выбор режимов работы каждой из них задается автономно. Предусмотрены режим ручного и автоматического управления системой с заданием амплитуды и частоты колебания платформы. С помощью органов управления ПУИС можно воздействовать на показатели работы электрогидравлических приводов пульсатора, гидравлических приводов пульсатора, тем самым изменяя частоту и амплитуду вибрации испытательной платформы. Кроме этого, ПУИС осуществляет защиту оборудования пульсатора от нежелательных и аварийных режимов работы.

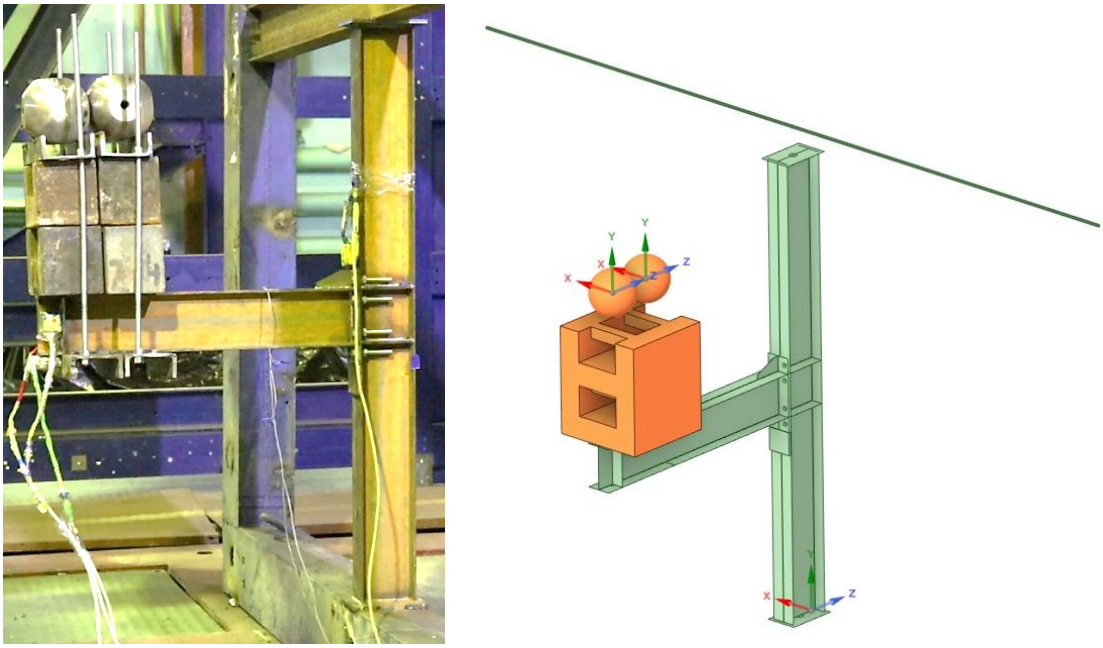
Периодические испытания моделей выполнялись на вибростенде с заданной частотой от 5 до 45 Гц (рис. 9).



1 — верхний тензодатчик; 2 — нижний тензодатчик; 3, 4 ,5 — акселерометры

Рисунок 9. *Расположение измерительных приборов (рисунок авторов)*

На консольную часть исследуемой модели, установленной на вибростенд, последовательно прикладывался груз массой 55, 96, 145 кг. Приращение частоты действия вибростенда составляло не более 10 % от полного диапазона. Показания приборов фиксировались на каждой установленной частоте (рис. 10).



a b

Рисунок 10. *Загружение конструкции на сейсмоплатформе:*
a — физическая модель; b — цифровая модель (рисунок и фото авторов)

В процессе испытания для каждого этапа получены записи значений деформаций с тензодатчиков в зависимости от времени, визуально оценено наличие пластических деформаций, нарушения целостности и появление трещин (с фотофиксацией). Описано напряжённо-деформированное состояние рассматриваемых образцов по результатам натурных испытаний. Выявлено, что возможно появление пластических деформаций в зоне сварного шва, прикрепляющего нижний пояс ригеля к колонне, которые не приводят к разрушению узла в целом.

Полученные результаты экспериментальных и численных исследований (табл. 1) дают представление о реальной физической модели деформирования, позволяют обоснованно выбирать пределы идеализации расчетной модели, создавать КЭ — модель в соответствии с реальной физической моделью работы конструкции при сейсмических воздействиях.

Таблица 1

Результаты экспериментальных и численных исследований модели узла

Частота, Гц	Отрезок времени испытания, сек	Относительные деформации ε		Погрешность
		опыт	цифровая модель	
		мм/мм	мм/мм	%
1	130–160	9,21E-07	8,13E-07	11,68
4	290–320	3,79E-07	4,12E-06	8,54
7	500–530	1,22E-05	1,24E-05	2,10
10	600–617	2,23E-05	2,11E-05	5,32
13	700–715	3,99E-05	3,85E-05	3,52
16	750–770	4,59E-05	4,33E-05	5,77
19	880–900	4,22E-05	4,48E-05	6,32
22	1020–1040	3,84E-05	3,78E-05	1,59
25	2380–2420	2,55E-05	2,32E-05	8,90

Анализ и сопоставление результатов (рис. 11) позволяют разработать рекомендации по применению конечно-элементных программных комплексов при моделировании рамных узлов стальных конструкций, избегая дорогостоящих и длительных циклов разработки «проектирование — изготовление — натурные испытания».

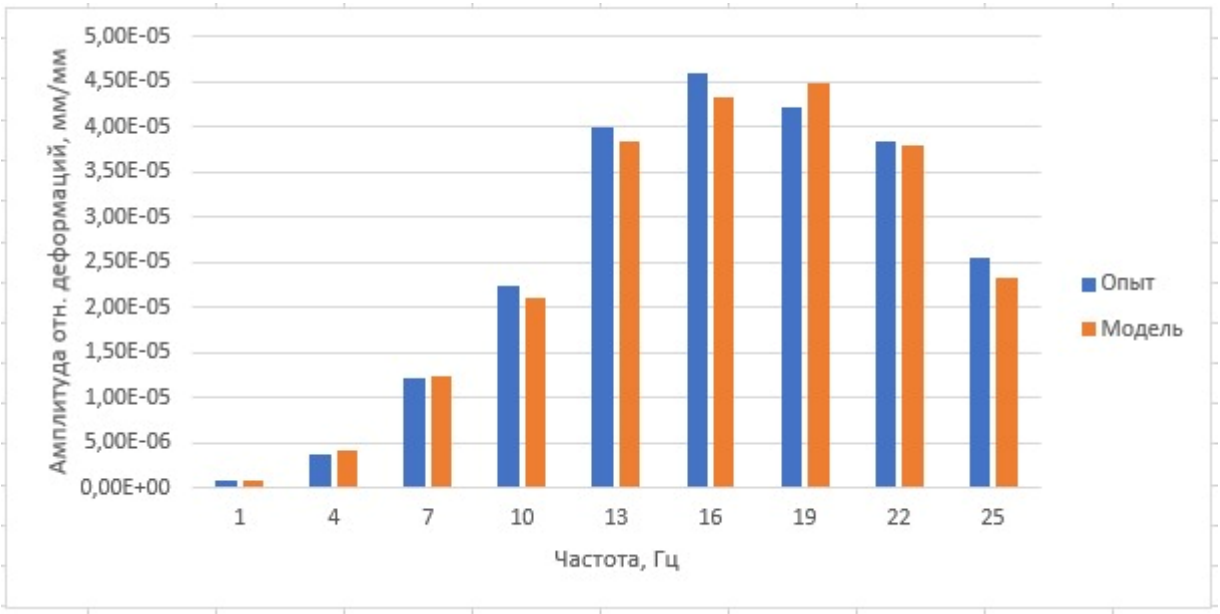


Рисунок 11. *Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований модели узла (рисунок авторов)*

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Т. Мирсаяпов и Д.М. Нуриева, «Расчет многоэтажных каркасных зданий на сейсмические воздействия с учетом физически нелинейного поведения,» Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, № 1, С. 7–14, 2003.
2. Mohiuddin Ali Khan. Seismic Design for Buildings, M.I.C.E. (London), in Earthquake-Resistant Structures, 2013 ISBN 978-1-85617-501-2 DOI: https://doi.org/10.1016/C2009-0-19143-2.
3. Vu, A.-T. Optimization of steel structures based on differential evolution algorithm / A.-T. Vu, F. Werner // 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering. — Weimar, Germany, 07–09 July 2009.
4. Злочевский А.Б. Экспериментальные методы в строительной механике. — М.: Стройиздат, 1983. — С.192.
5. Маилян, Л.Р., Зубрицкий, М.А., Ушаков, О.Ю., & Сабитов, Л.С. (2020). Расчет высотных сооружений при сейсмическом воздействии уровня «контрольное землетрясение» нелинейным статическим методом на примере адыгейской ВЭС. Строительные материалы и изделия, 3(1), С. 14–20.
6. Букунов А.С. Обработка информации для принятия решений при информационном моделировании // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. СПб.: СПбГАСУ, 2020. С. 386–392. DOI: https://doi.org/10.23968/BIMAC.2020.050.
7. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S. Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. С. 012108.
8. Бузало Н.А., Черныховский Б.А., Алексеева А.С. Modelling framework joints in ANSYS software complex [Электронный ресурс] IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 687(3): International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety 25–27 September 2019, Chelyabinsk, The Russian Federation. — № 033036. — URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/687/3/033036/pdf.
9. Бузало Н.А., Черныховский Б.А., Алексеева А.С. Numerical modeling of steel structures connections, Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021), 17–21 May, Sochi / Editors Andrey A. Radionov, Vadim R. Gasiyarov. — Switzerland: Springer, 2022. — Vol. 1. — P. 348–357. — (Lecture Notes in Mechanical Engineering).
10. Беленя Е.И., Балдин В.А., Веденников Г.С. Металлические конструкции // ISBN: 978-5-458-36164-4. 2022 г. С. 560.
11. Ведяков И.И., Еремеев П.Г. «К вопросу живучести строительных конструкций». Строительная механика и расчет сооружений. — 2008. — № 4. — С. 76–78.
12. Букунов А.С. Обработка информации для принятия решений при информационном моделировании // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. СПб.: СПбГАСУ, 2020. С. 386–392. DOI: https://doi.org/10.23968/BIMAC.2020.050.
13. О.П. Исакова, Ю.Ю. Тарасевич, Ю.И. Юзюк. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin. — М.: Книжный дом «ЛИБКОМ», 2009. — 136 с. — ISBN 978-5-397-00183-0.

Alekseeva Anastasia Sergeevna
Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia
E-mail: nastja3post@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8541-2586
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1170792
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193738963

Buzalo Nina Aleksandrovna
Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia
E-mail: buzalo_n@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6204-0214
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190964121

Platonova Irina Dmitrievna
Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia
E-mail: irinplatonova@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7758-7119
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAD-5749-2021
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57214067914

Experimental research multi-storey buildings steel frame flange joints under seismic impact

Abstract. In the coming years, our country is projected to expand the use of steel frames in the construction of multi-storey residential buildings, especially in earthquake areas. The massive use of steel for the frames of civil buildings highlights the problems of reducing the material consumption of elements and components of the frames, the development of new effective design solutions that make it possible to optimally use their bearing capacity. At the same time, the tasks of increasing the reliability and durability of structures should be solved, which is possible only if verified calculation models are used in the design. As part of the dissertation research of one of the authors, the operation multi-storey buildings steel frame flange joints was studied. A finite element model of the connection was created, to clarify the stress-strain state of which and to study the nature of the acting loads, experimental research were performed. When designing earthquake-resistant buildings, it is necessary to take into account that during earthquakes, individual supporting structures and their nodes are damaged, while the system itself changes its frequency response, dissipative, strength and stiffness properties over time. For the numerical integration of the equations of motion and experimental studies of the flange assembly of the steel frame, it is necessary to set the average values of the oscillation frequencies. According to the instrumental records of base accelerations available in the open press during real earthquakes, graphs of the acceleration amplitudes were plotted, the frequency response was obtained after processing the data arrays, the prevailing frequencies and the corresponding acceleration amplitudes were noted. Dynamic tests of the samples were carried out on a hydroelectric vibration platform. The appearance of plastic deformations in some elements and joints was revealed, which do not lead to the destruction of the assembly as a whole. The results of experimental and numerical research give an idea of the real physical model of deformation and destruction of the structure, allow to reasonably choose the limits of the idealization of the calculation model, create a digital model in accordance with the real physical model of the structure in operation.

Keywords: civil buildings steel frame flange joints; seismic impacts; experimental research; frequency response