



## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОФИЛЕЙ ГСП

Евгений Васильевич Горохов<sup>1</sup>, Владимир Филиппович Мушчанов<sup>2</sup>,  
Александр Владимирович Мушчанов<sup>3,4</sup>, Павел Андреевич Капустин<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

<sup>4</sup> Bau Проект, Краснодарский край, Краснодар, Россия

<sup>5</sup> Строительная Компания Велесь, Московская область, Апрелевка, Россия

<sup>1</sup> mk@donnasa.ru, <sup>2</sup> mvf@donnasa.ru, <sup>3,4</sup> a.v.mushchanov@donnasa.ru, <sup>5</sup> p.kapustin@skveles.ru

**Аннотация.** В статье выполнен анализ конструктивных решений узловых соединений и методов расчета структурных конструкций. Подробно рассмотрены как традиционные, так и современные узловые решения, требующие апробации. Проанализированы возможные методы расчета узлов и элементов структурных конструкций в соответствии с отечественными и зарубежными нормами проектирования. Выявлено, что традиционные конструктивные решения узлов не позволяют использовать замкнутые гнuto-сварные профили в составе стержневых элементов структурных покрытий. В части оценки напряженно-деформированного состояния выявлено, что основополагающими методами оценки напряженно-деформированного состояния стержневых элементов в рамках отечественных и зарубежных норм проектирования являются аналитические и численные конечно-элементные (КЭ) методы расчета. В части оценки напряженно-деформированного состояния узловых соединений аналитические методы оценки НДС отражены только в зарубежных нормах, а отечественные программные комплексы построены лишь на оценке напряженно-деформированного состояния стержневых элементов, без учета влияния узловых соединений.

**Ключевые слова:** металлические конструкции, структурные покрытия, гнuto-сварные профили, узловые соединения, метод конечных элементов

**Для цитирования:** Методы оценки напряженно-деформированного состояния узлов и элементов структурных конструкций с применением профилей ГСП / Е. В. Горохов [и др.]. // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2024. Т. 20, № 3. С. 111–131.  
doi: 10.71536/spgs.2024.v20n3.1. edn: oufdzb.

Original article

## METHODS FOR ASSESSING THE STRESS-STRAIN STATE OF NODES AND ELEMENTS OF STRUCTURAL STRUCTURES USING GSP PROFILES

Yevgen V. Gorokhov<sup>1</sup>, Vladimir F. Mushchanov<sup>2</sup>,  
Alexander V. Muschanov<sup>3,4</sup>, Pavel A. Kapustin<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia

<sup>4</sup> Bau Project, Krasnodar region, Krasnodar, Russia

<sup>5</sup> Construction Company Veles, Moscow region, Aprelevka, Russia

<sup>1</sup> mk@donnasa.ru, <sup>2</sup> mvf@donnasa.ru, <sup>3</sup> a.v.mushchanov@donnasa.ru, <sup>4,5</sup> p.kapustin@skveles.ru

**Abstract.** The article analyzes the design solutions of nodal joints and methods of calculation of structural structures. Both traditional and modern nodal solutions requiring approbation are considered in detail.



Possible methods of calculation of knots and elements of structural structures in accordance with domestic and foreign design standards are analyzed. It has been revealed that traditional design solutions of nodes do not allow to use closed bent-welded sections as a part of rod elements of structural coverings. In the part of stress-strain state estimation it is revealed that the fundamental methods of stress-strain state estimation of rod elements within the framework of domestic and foreign design standards are analytical and numerical finite element (FE) calculation methods. In terms of stress-strain state estimation of nodal joints, analytical methods of VAT estimation are reflected only in foreign standards, and domestic program complexes are based only on the stress-strain state estimation of rod elements, without taking into account the influence of nodal joints.

**Keywords:** metal structures, structural coatings, bent-welded profiles, nodal connections, finite element method

**For citation:** Methods for assessing the stress-strain state of nodes and elements of structural structures using GSP profiles / Ye. V. Gorokhov [et al.]. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2024;20(3):111–131. (In Russ.). doi: 10.71536/spgs.2024.v20n3.1. edn: oufdzb.

### Актуальность использования ПСМК в строительстве

Проектирование пространственных стержневых металлических конструкций (сокращенно – ПСМК) представляет серьезный научный и практический интерес, что подтверждается их многократным использованием во всех сферах строительной отрасли. Такие покрытия в большинстве случаев рассчитываются в различных программных комплексах для расчета и проектирования строительных конструкций, расчетная схема которых представлена как многократно статически-неопределимая шарнирно-стержневая система, в которой результирующим усилием при подборе сечения является продольное усилие, возникающие в отдельно взятом стержне.

При этом следует отметить отсутствие практики применения в качестве стержневых элементов структурных покрытий наиболее распространенного в настоящее время гнуто-сварного профиля, ограничивая эту сферу лишь круглыми трубами. Соответственно, такое ограничение вызывает отсутствие апробированных в практике проектирования и строительства соответствующих типов узловых соединений и исследований по их влиянию на работу покрытия в целом. Отмеченные выше проблемы в целом определяют цель и задачи проводимого исследования.

### Цели и задачи исследования

**Целью исследования** выступает анализ методов оценки напряженно-деформированного состояния

узлов и элементов структурных конструкций с применением профилей ГСП для выполнения дальнейших аналитических, численных и экспериментальных исследований.

#### Задачи исследования:

1. Выполнить критический анализ актуальности ключевых тем исследований.
2. Выполнить критический анализ существующих методов расчета ПСМК.

### Критический анализ актуальности

Анализируя научные труды в коллекции электронных журналов ScienceDirect и РИНЦ следует отметить, что область изучения ПСМК имеет множество различных направлений исследований. Главенствующие векторы можно разделить на 2 большие группы: формообразование и исследование напряженно-деформированного состояния конструкций покрытий (рисунок 1). В первой подгруппе, наибольший научный интерес в вопросах формообразования представляет собой оптимизация геометрии покрытия различными методами оптимизации. Немногим меньшее количество трудов посвящается формированию геометрии покрытия путем получения начальных деформаций при первой итерации и задание новой геометрии конструкции с учетом деформированной схемы. Одним из новых направлений является формирование сложной геометрии конструкции путем программирования с условиями задания начальной нагрузки и оптимальной геометрии как покрытия, так и



Рисунок 1 – Наиболее популярные исследования в ПСМК.

каждого элемента в ее составе, используя в качестве сжатых элементов – стальные прокатные сечения, а в качестве растянутых элементов – канаты (так называемая конструкция Тенсегрити). Во второй подгруппе большое внимание уделяется созданию новых узловых соединений методами автогенерации геометрии, адаптируемой под направления усилий, возникающих в узле. Однако, данный подход требует соответствующей апробации в рамках практического применения. Не меньший интерес вызывает как конструирование узловых соединений классическим конструированием, без применения автогенерации, так и оптимизация конструктивных решений узловых соединений.

В третьей группе, в разрезе исследований которых лежит напряженно-деформированное состояние стержневых элементов конструкций, доминирующими направлениями являются исследования бистальных элементов и композитных материалов в стержневых элементах конструкций. Также, большое внимание уделяется вопросам устойчивости и деформативности стержневых элементов конструкций, вопросам устойчивости конструкции к прогрессирующему обрушению, а также учет вышеуказанных факторов при динамических нагружениях, под которыми авторы принимают во внимание сейсмическое воздействие. Значительно меньшее количество

работ связано с вопросами оценки несущей способности стержневых элементов за счет влияния работы узловых соединений в составе покрытия. Данный факт объясняется тем, что подходы к решению данных задач являются достаточно трудоемкими в виду комплексности инструментов для их решения.

В четвертом подразделе наибольшее внимание научного сообщества сосредоточено на методах, позволяющих учесть конструктивные несовершенства узловых соединений и оценку накопленных повреждений в процессе эксплуатации конструкции. Проводится оценка влияния данных параметров на напряженно-деформированное состояние элементов узловых соединений и приводятся соответствующие рекомендации по улучшению конструктивных решений узлов. Также, большое внимание уделяется вариации конструктивных решений известных узловых соединений и их влияния на значение поворотной жесткости узла, влияющей на несущую способность стержневых элементов покрытия. Немногим менее проводятся исследования, связанные с оценкой усталостных напряжений в узловых соединениях и их влияния на напряженно-деформированное состояние узлов. А также, разработке новых узловых соединений, апробация которых проводится численными и экспериментальными методами исследования.

С точки зрения исследования узловых соединений в конструкциях оболочек следует отметить, что большинство проектируемых узловых соединений (как предлагаемых авторами, так и существующих) считаются полужесткими узловыми соединениями, имеющими значение начальной поворотной жесткости для сопротивление узловому изгибающему моменту, относящееся к зоне второй кривой по зависимости Фигура-Момент, представленной для оценки жёсткости узловых соединений в Еврокод 3. К важности данного вопроса мы вернемся немного позже.

Подводя итоги актуальности, пользуясь функцией аналитики в наукометрической базе – SCOPUS, проведем оценку научного интереса к общей тематике проектирования ПСМК и конкретно к оценке работы узловых соединений в составе таких конструкций. В целом, за период 2014–2024 г. в среднем выпускается около 1 000 научных трудов в год по направлению исследования ПСМК (рисунок 2, а). Наибольшее количество трудов, написанных в этой области исследования, опубликованы авторами Китая, США, Индии, Италии и Германии. Россия находится на 13-м месте, опережая Иран и Австралию, но пропустив Испанию, Канаду, Голландию, Южную Корею, Японию, Великобританию и Францию (рисунок 2, б).

Что касается проектирования узлов ПСМК, за период 2014–2024 г. в среднем выпускается около 65–70 научных трудов в год (рисунок 3, а), а наибольшее количество трудов, написанных в этой области исследования, опубликованы авторами Китая, США, Японии, Италии и Германии.

Россия находится на 15-м месте, пропуская Австрию, Гон-Конг, Голландию, Канаду, Австралию, Францию, Южную Корею, Великобританию и Индию (рисунок 3, б).

Анализируя отечественную наукометрическую базу РИНЦ (рисунок 4) отметим, что за 10-ти летний рассматриваемый период всего выпущено 1 417 научных трудов, из которых:

- 27 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук;
- 3 диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук;
- 1 диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры;
- 3 диссертации на соискание ученой степени физико-математических наук;
- 773 публикации статей в научных журналах;
- 495 материалов по результатам конференций;
- 114 патентов;
- 1 выполненный грант.

Также, отметим, что из 1 268 научных трудов за период 2014–2024 года, лишь около 260 цитируются в наукометрической базе SCOPUS, что составляет 20,5 %.

Изучая опыт проектирования ПСМК, можно отметить, что определяющим при назначении конструктивных решений является состав узла, обусловленный его технологией изготовления, условиями восприятия усилий и аналитической оценкой его жесткостных характеристик. Конструктивные решения узловых соединений ПСМК можно условно разделить на две группы – узлы и элементы для двухпоясных конструкций (перекрестные фермы, двухпоясные



Рисунок 2 – SCOPUS-Аналитика за период 2014–2024 год (ПСМК): а) количество трудов; б) страны-лидеры.



Рисунок 3 – SCOPUS-Аналитика за период 2014–2024 год (Узлы ПСМК): а) количество трудов; б) страны-лидеры.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВОГО ЗАПРОСА**

ВСЕГО НАЙДЕНО ПУБЛИКАЦИЙ: 1417 из 50731512

№	Публикация	Цит.
1	<b>ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПЕРЕКРЕСТНО-СТЕРЖНЕВЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ</b> Киркелов А.А. Вектор научной мысли. 2023. № 4 (4). С. 11-14.	0
2	<b>АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ НЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Лутычева А.В. Научный электронный журнал Меридиан. 2020. № 19 (50). С. 273-275.	0
3	<b>ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Мушанов А.В., Дельцов М.М. Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4. № 1. С. 52-57.	0*
4	<b>РЕЗЕРВЫ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ НЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Коркин А.В., Кудашкин Ю.И., Зейд К.Л.З. Научное обозрение. 2016. № 16. С. 15-21.	3
5	<b>ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ НЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Лавров Н.А., Болышева З.В. В сборнике: Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур (SAFETY2017). Сборник материалов международной конференции. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Строительный институт; НИЦ Надежность и ресурс больших систем и мадам УрО РАН; Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union; MARUEEB. 2017. С. 278-288.	0
6	<b>КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ, СТЕРЖНЕВАЯ СИСТЕМА "МАРХИ". СРАВНЕНИЕ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ С КОНСТРУКЦИЯМИ ИЗ ПРОКАТНОЙ СТАЛИ</b> Иванов Е.А., Коновалов О.М. В сборнике: Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Под общей редакцией Т.В. Шепелько. 2020. С. 50-52.	0
7	<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕКРЕСТНО-СТЕРЖНЕВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВЫПОЛНЕНИЕМ РАЗГРУЗКИ ПРИ ПОМОЩИ КРАЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ</b> Ганен М.А., Емельянова Г.А., Костенко С.А. Экономика строительства. 2023. № 3. С. 73-82.	0
8	<b>ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ПЕРЕКРЕСТНО-СТЕРЖНЕВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Ганен М.А., Емельянова Г.А., Костенко С.А. Инновации и инвестиции. 2023. № 3. С. 242-246.	0
9	<b>НАДЕЖНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ УСЕЧЕННЫХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КУПОЛОВ</b> Мушанов В.Ф., Ореховский А.Н., Каданко М.П., Зубенко А.В. Металлические конструкции. 2023. Т. 29. № 1. С. 47-61.	0
10	<b>РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СБОРКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Кретькин А.М. В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА. Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня образования НГАСУ (Обстрем). Редакционная коллегия: В.В. Дегтярев, В.М. Макасов, Г.И. Гребенков, Д.В. Карелин, И.А. Косолапов, П.Н. Танбошев, М.М. Титов, Ю.Е. Волобуевников, Т.А. Иващенко, В.А. Селезнева. 2015. С. 53-57.	0
11	<b>КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОРБИНИРОВАННЫМИ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ</b> Кузнецов И.М., Кузнецов Д.О., Фридрих В.М., Антонова М.А. Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. № 4 (81). С. 14-24.	0
12	<b>ПЕРЕКРЕСТНО-СТЕРЖНЕВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ (ПСМК) "МАРХИ"</b> Воронцов Е.О., Орехов П.А., Павлова С.А. Строительство и недвижимость. 2021. № 1 (8). С. 7-13.	0

Рисунок 4 – RINCE-Аналитика за период 2014–2024 год.

стержневые оболочки, структурные покрытия,) и узлы и элементы для однопоясных конструкций (однопоясные оболочки).

Рассматривая конструктивные решения узловых соединений системы ферм «Молодечно» отметим, что такие фермы часто применяются в виде перекрестных ферм из замкнутых гнутосварных профилей (ГСП) с бесфасоночными соединениями элементов. Как пример, на рисунке 5 представлено проектное решение сопряжения системы продольных и поперечных ферм к колонне. Такое конструктивное решение узлов предполагает определенное значение начальной поворотной жесткости, из-за чего такой узел нельзя отнести к идеально шарнирному в чистом виде. Однако следует отметить, что в связи с применением системы перекрестных ферм на планах различного соотношения сторон – перераспределение усилий в фермах, как известно, меняется. В связи с чем, необходим комплексный подход к исследованию напряженно-деформированного состояния не только стержневых элементов ферм, но и узловых соединений. Однако, данный фактор отечественные нормы проектирования не регламентируют. В результате можно увидеть, что при проявлении в периоде эксплуатации расчетной ситуации, в которой атмосферные нагрузки превышают регламентируемые в нормативных документах происходят аварии, в которых разрушения локализируются не в элементах покрытия, а, непосредственно, в узлах сопряжения, что указано на рисунках 6, а–г.

Далее, представлены конструктивные решения узловых соединений, которые могут использоваться и для элементов структурных покрытий, и для элементов двухпоясных оболочек. Узловые соединения можно разделить на две подгруппы по способу соединений: на постоянных болтах и комбинированные соединения с монтажной сваркой. Рассмотрены известные решения узловых соединений для двухпоясных оболочек и структурных конструкций зарубежных исполнений – рисунок 7 – немецкое решение MERO, рисунки 8 и 10 – великобританские системы Nodus и Space Deck, 9 – американская Unistrut. Фактически, все представленные конструктивные решения основаны на применении в качестве стержневых элементов покрытия – круглых труб, а соединительными элементами выступают литые сферы либо полусферы. Исключение составляет американская система Unistrut, основанная на применении гнутых листовых элементов в качестве соединителей швеллеров.

Далее, представлены узловые соединения для двухпоясных оболочек и структур, но эти конструктивные решения разработаны в Советском Союзе. Отметим, что здесь многообразие конструктивных решений шире, однако наибольшее применение получило узловое решение Московского института МАРХИ, представленное на рисунке 11, разработанное покойным Вячеславом Константиновичем Файбишенко, созданное по аналогии с MERO с некоторыми конструктивными отличиями в исполнении коннектора.

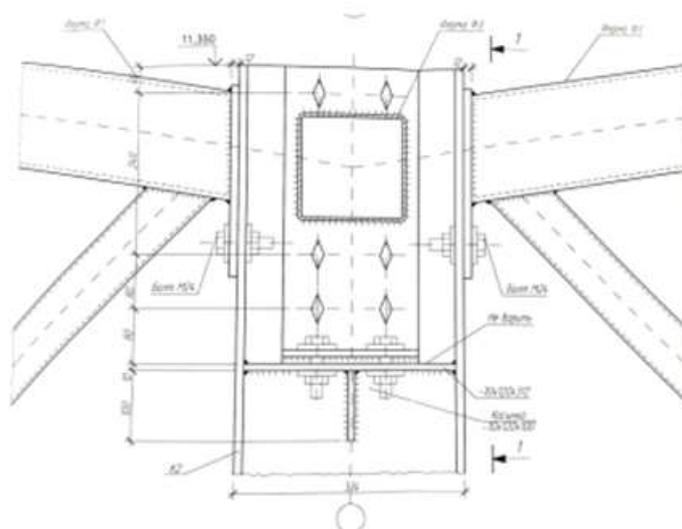
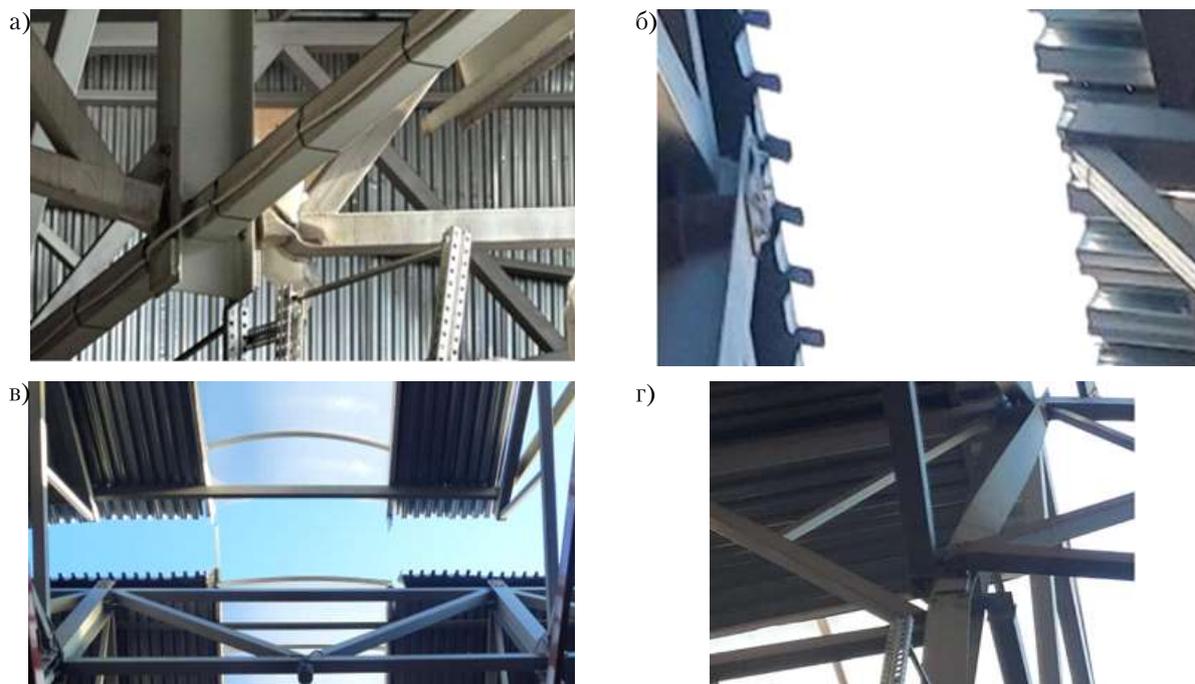
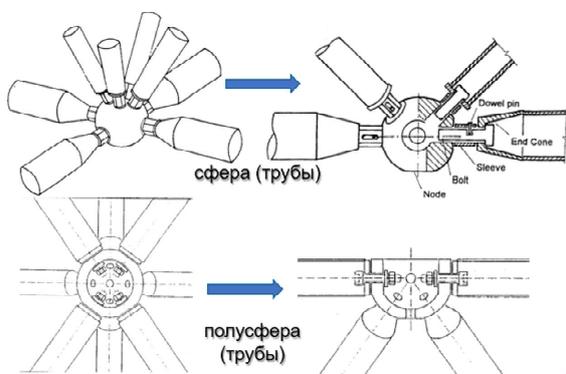


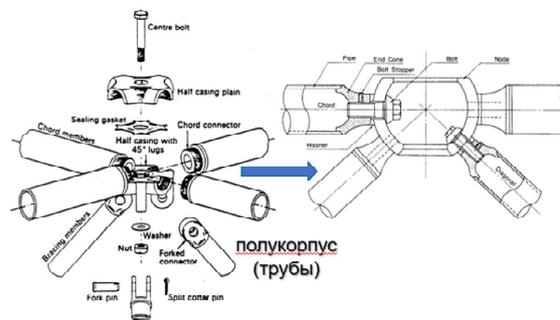
Рисунок 5 – Проектное решение узлов перекрестных ферм «Молодечно».



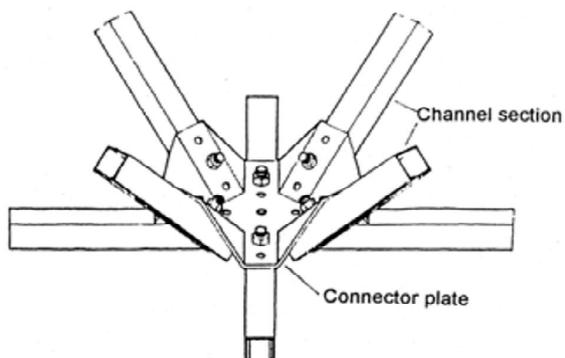
**Рисунок 6** – Повреждения в узлах сопряжения ферм: а) пластические деформации узла нижнего пояса; б) отрыв сварного шва в узлах верхнего пояса от колонны; в) отрыв сварного шва в узлах верхнего пояса от колонны (поворот на 90 °С); г) деформация сечения колонны с последующим вращением узла нижнего пояса фермы.



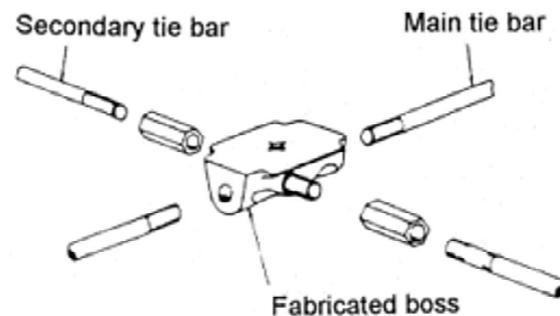
**Рисунок 7** – Конструктивные решения фирмы MERO (Германия).



**Рисунок 8** – Конструктивные решения фирмы Nodus (Англия).



**Рисунок 9** – Конструктивные решения фирмы Unistrut (США).



**Рисунок 10** – Конструктивные решения фирмы Space Deck (Англия).

Также, на рисунке 12 представлено конструктивное решение ЦНИИСК им. Кучеренко, для выполнения структурных покрытий из одиночных уголков, а на рисунке 13 – система «Сокол» для использования широкополочных двутавров.

Также, рассмотрены зарубежные конструктивные решения комбинированных узловых соединений – рисунок 14 – немецкая система «Oktaplatte», рисунок 15 – Французская система «Unibat», рисунок 16 – экспериментальное решение наплавлением металла. Известным соединением, выполненным на монтажной сварке, является немецкая разработка «Oktaplatte», в которой соединение стержней и соединительной элемента выполняется путем обварки круглых труб по контуру к литому шаровому коннектору. Французская система «Unibat» позволяет использовать двутавры в качестве несущих элементов покрытия на монтажной сварке. На рисунке 16 представлены исследования, проводимые на сегодняшний день. Так, с помощью технологий 3D-печати, на основе генетической оптимизации формы узла и предварительной оценки напряженно-деформированного состояния узлового соединения структурных покрытий, 3D-принтером по металлу EOS M280 разработана форма узла покрытия. Такая разработка была представлена на международной конференции Computer-Aided Design & Applications в 2020 году исследователями из Сингапура и имела множество цитирований в наукометрической базе SCOPUS.

Здесь также представлены узловые соединения для двухпоясных оболочек и структур, разработанные в Советском Союзе. На рисунках 17 и 18 представлены соединения на монтажной

сварке, разработанные ЦНИИСК им. Кучеренко для применения спаренных уголков и труб со сплюснутыми концами, приваренными к монтажной пластине.

Далее, представлены известные решения узловых соединений для однопоясных оболочек применением постоянных болтовых соединений зарубежных исполнений – рисунок 19 и 20 – немецкие решения MERO и TRIODETIK, позволяющие использовать как круглые так и квадратные трубы в составе однопоясных оболочек.

На рисунках 21–23 представлены отечественные решения для однопоясных оболочек в комбинированном исполнении, разработанные как во времена Советского Союза, так и в Российской Федерации. Конструктивное решение ЦНИИСК, представленное на рисунке 21 имеет подобие с узлом, представленным для структурных конструкций с разницей лишь в том, что пространство в контуре сплюснутых труб заполняется сваркой, а не приваривается к монтажной пластине. С течением времени, компанией ООО «РОСИНЖИНИРИНГ» были разработаны типовые решения Basic и Light, представленные на рисунках 22 и 23 соответственно для геодезических куполов диаметром от 7 до 30 м соответственно.

Также, предлагается на рассмотрение конструктивное решение, предложенное коллективом авторов ДОННАСА для реализации в структурных покрытиях с применением замкнутых гнутосварных стержней, общий вид которого представлен на рисунке 24, а поэлементное представление на рисунках 25–28. Данное решение предполагает постоянные болтовые соединения без применения монтажной сварки с минимальными затратами на изготовление коннектора.

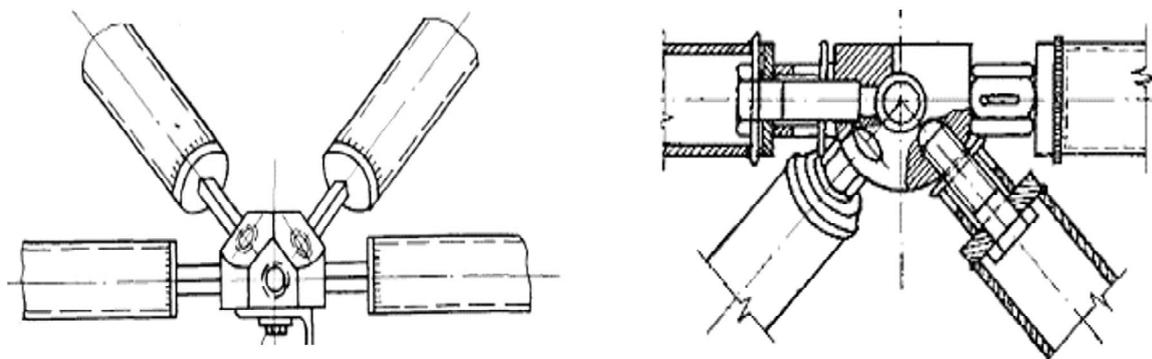


Рисунок 11 – Конструктивные решения института МАРХИ.

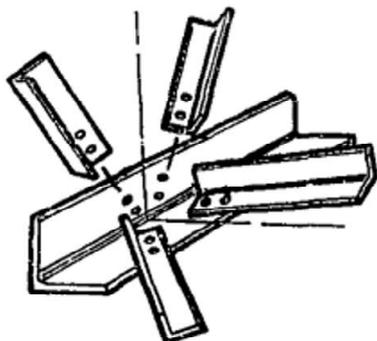


Рисунок 12 – Конструктивные решения ЦНИИСК им. Кучеренко.

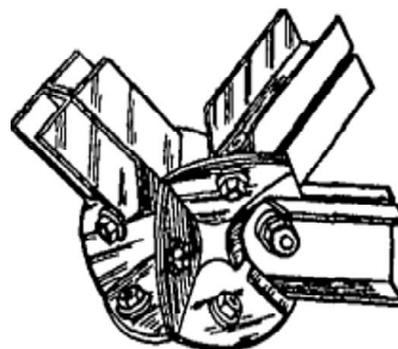


Рисунок 13 – Конструктивные решения «Сокол».

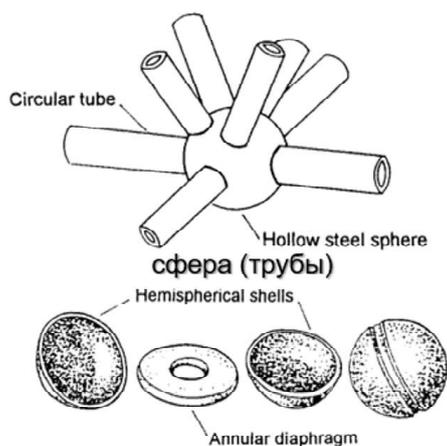


Рисунок 14 – Конструктивные решения института «Октаplatte».

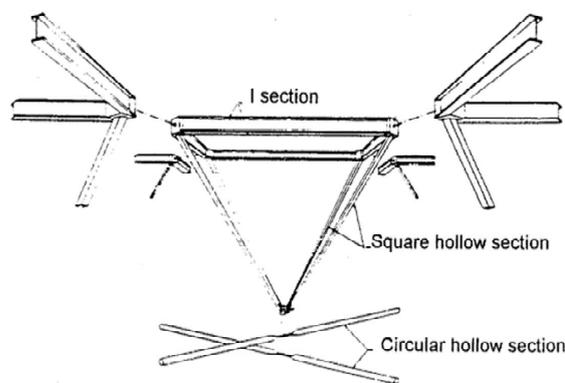


Рисунок 15 – Конструктивные решения «Unibat» (Франция).



Рисунок 16 – Конструктивные решения созданием печатной формы.



Рисунок 17 – Конструктивные решения «ЦНИИСК».

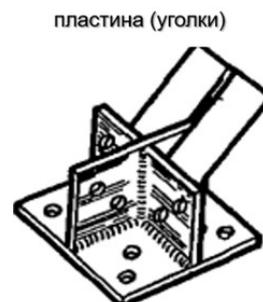


Рисунок 18 – Конструктивные решения «ЦНИИПСК».

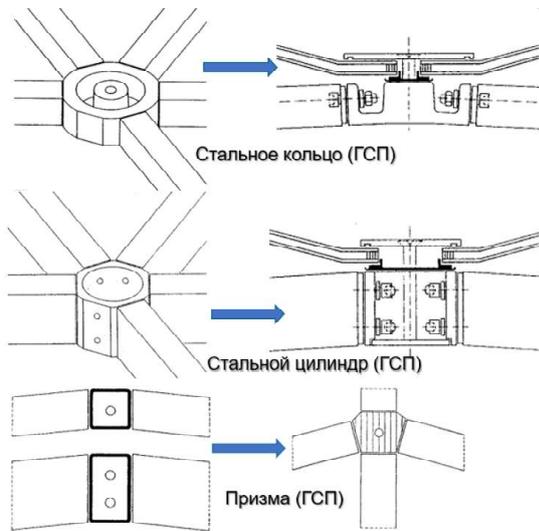


Рисунок 19 – Конструктивные решения «MERO» (Германия).

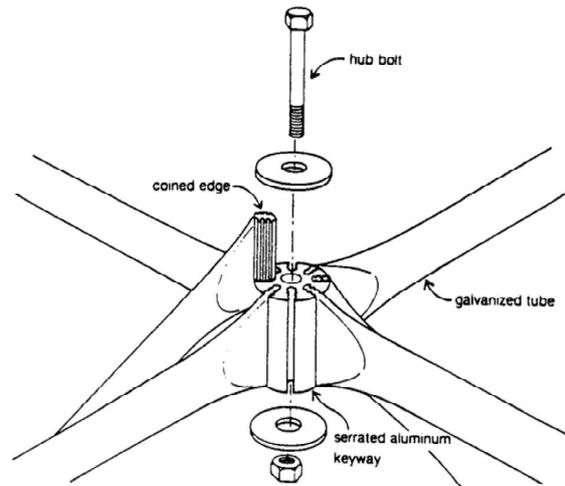


Рисунок 20 – Конструктивные решения «Triodetik» (Германия).



Рисунок 21 – Конструктивные решения «ЦНИИСК».

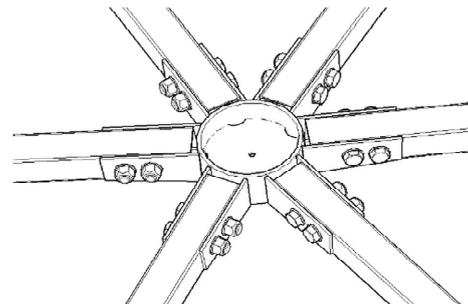


Рисунок 22 – Конструктивные решения компании «Росинжиниринг» – «Basic».

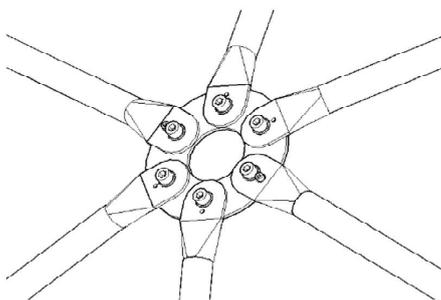


Рисунок 23 – Конструктивные решения компании «Росинжиниринг» – «Light».

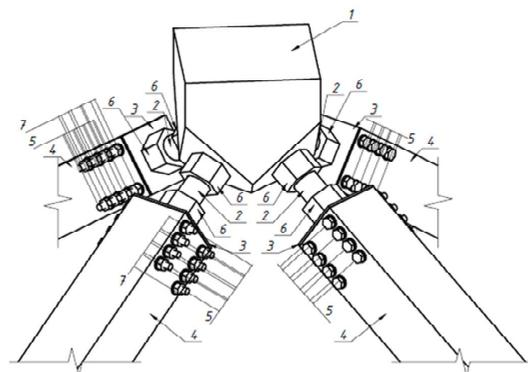


Рисунок 24 – Конструктивные решения, запатентованные «ДОННАСА».

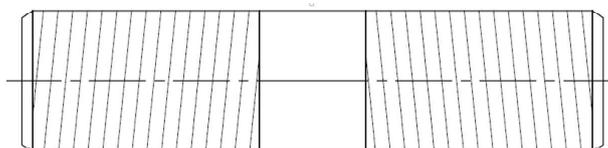
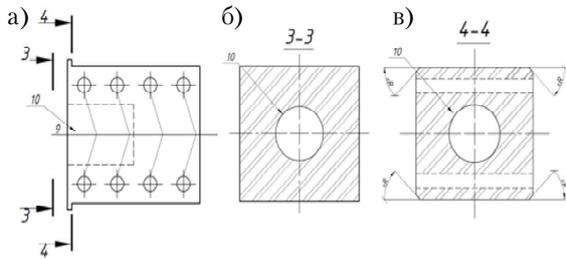
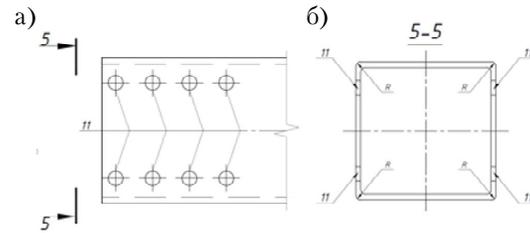


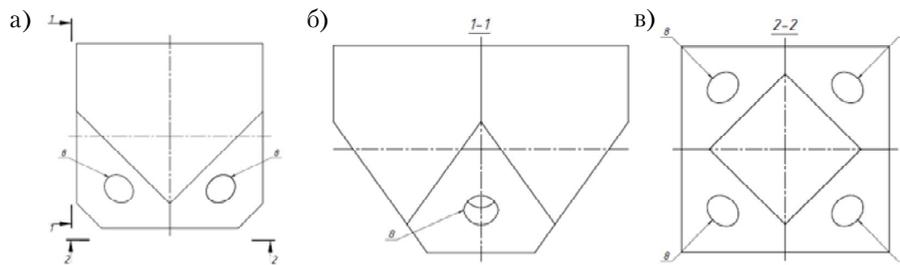
Рисунок 25 – Высокопрочная шпилька (Поз. 2).



**Рисунок 26** – Соединительный элемент (заглушка) (Поз. 3): а) главный вид; б) разрез 3-3; в) разрез 4-4.



**Рисунок 27** – Стержень (раскос) (Поз. 4): а) главный вид; б) разрез 5-5.

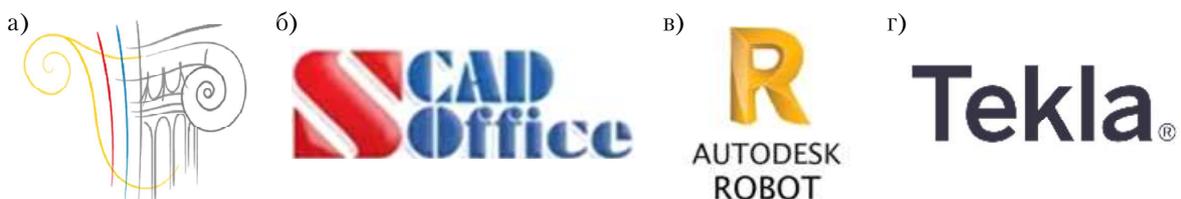


**Рисунок 28** – Коннектор (Поз. 1): а) главный вид; б) разрез 1-1; в) разрез 2-2.

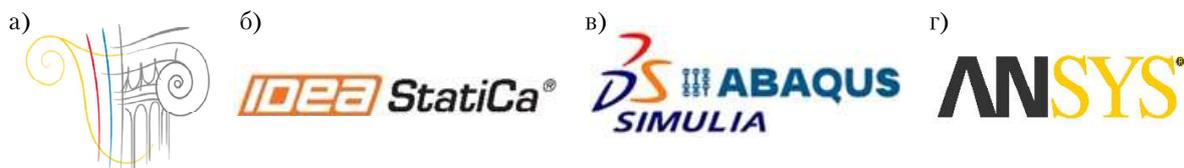
### Критический анализ методов расчета

Обращаясь к существующим нормам РФ, регламентирующими нормативными документами по оценке НДС элементов стальных конструкций являются СП 16.13330.2017, СП 294.1325800.2017. Взарубежных аналогах – Еврокод 3 EN 1993-1-3 (8). Помимо нормативных документов, имеющих аналитические уравнения для оценки прочности, жесткости и устойчивости элементов структурных конструкций, выполнен ряд научных работ, в которых получены аналитические зависимости, которые не учитываются в нормах проектирования. Если рассматривать методы детализации расчетных схем общеизвестным фактом является то, что в классической постановке шарнирно-стержневые системы в упрощенном виде

моделируются стержневыми конечными элементами. Такое решение упрощает моделирование конструкции, не учитывая работу узловых соединений, оценивая при этом напряженно-деформированное состояние исключительно в стержневых элементах конструкций. Наиболее распространенными программными комплексами, которыми пользуются практически все наши коллеги на территории стран СНГ являются верифицированные ПК ЛИРА-САПР и SCAD Office, поддерживающие нормы проектирования РФ и их актуализацию. Аналогичными расчетными комплексами, которые также постепенно осваиваются нашими коллегами являются Autodesk Robot, и частично, Tekla Designer (рисунки 29–30).



**Рисунок 29** – Классическое КЭ-моделирование: а) LIRA-SAPR; б) SCAD Office; в) Autodesk Robot; г) Tekla Designer.



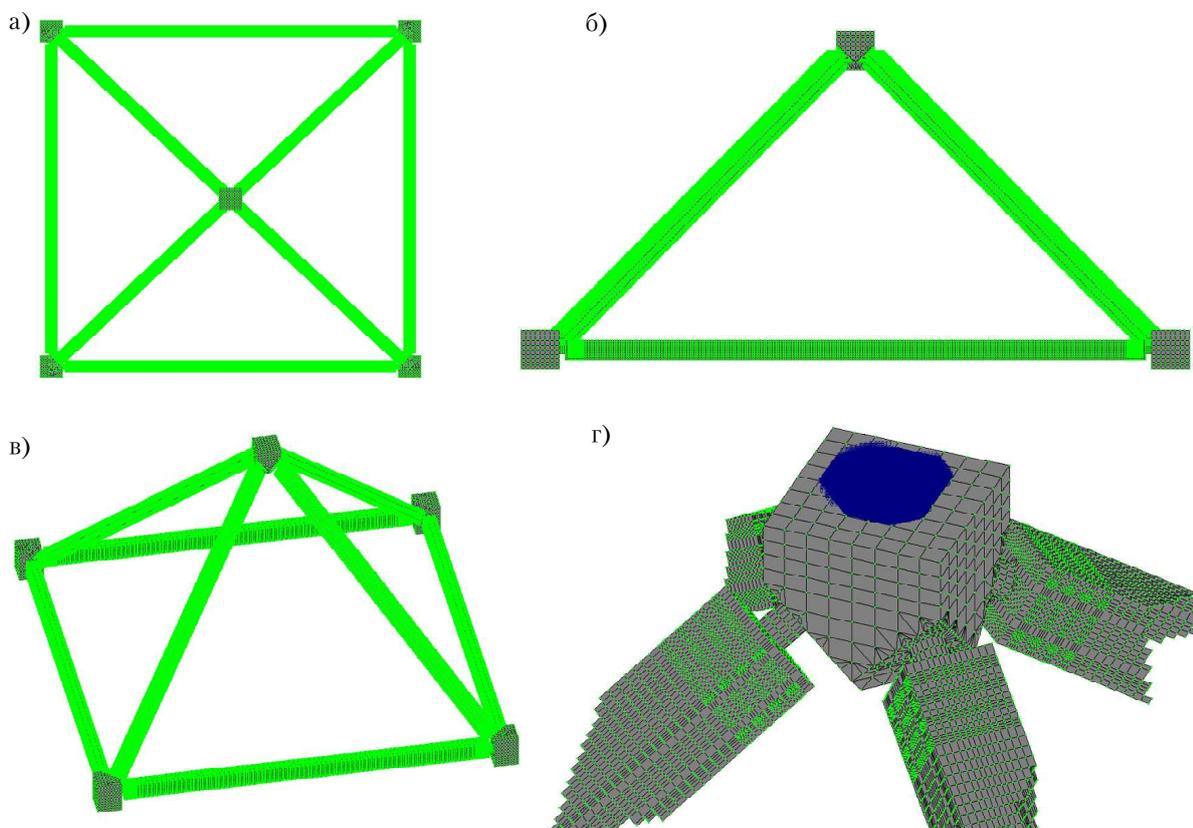
**Рисунок 30** – Уточненное КЭ-моделирование: а) LIRA-SAPR; б) IDEA Statica; в) ABAQUS Simulia; г) ANSYS Workbench.

Что касается моделирования и оценки НДС узловых соединений, здесь отечественные расчетные комплексы позволяют моделировать узловые элементы объемными конечными элементами, что является очень сложным и трудоемким процессом, в связи с чем игнорируется. В качестве примера, на рисунке 31 представлена объемная конечно-элементная модель ячейки структурного покрытия в программном комплексе ЛИРА-САПР. Зарубежным аналогом, заточенным под конкретное моделирование узловых соединений и оценке их работы в соответствии с нормами Еврокода EN 3-1993-8 является

программный комплекс IDEA STATICA, позволяющий производить оценку как напряженного состояния элементов узла, так и оценку его поворотной жесткости в составе конструкции. Универсальными программными комплексами для всех компонентов конструкции является общеизвестные ANSYS и ABAQUS SIMULIA, используемые в качестве базовых расчетных комплексов в зарубежных исследованиях.

Подводя итоги анализа, разделим исследование на три подгруппы:

1. Оценка начальной поворотной жесткости узловых соединений и влияние на элементы ПСМК:



**Рисунок 31** – Виды расчетной модели: а) вид модели сверху; б) вид модели сбоку; в) общий вид модели; г) схема приложения штамп-нагрузки на верхний коннектор.

- 1.1. Оценка влияния конструктивного решения на показатели начальной поворотной жесткости [1, 4–5, 28];
  - 1.2. Оптимизация геометрии узла за счет регулирования начальной поворотной жесткости к полужесткому соединению [2, 29, 38];
  - 1.3. Влияние жесткости соединения на конструкции ПСМК [25, 31–33, 37–38].
  2. Анализ устойчивости сжатых элементов ПСМК:
    - 2.1. Оценка влияния полужесткого соединения однопоясной сетчатой оболочки на показатели устойчивости стержней [3, 6];
    - 2.2. Оценка устойчивости стальных стержней ГСП с учетом усиления композитными материалами [8, 16, 36];
    - 2.3. Оценка локальной и общей устойчивости стержней круглых и квадратных из различных марок сталей [9–13, 15, 17];
    - 2.4. Оценка устойчивости тонкостенных, холодногнутых стержней [14, 18–22];
    - 2.5. Влияние кровельных систем на устойчивость сетчатых оболочек [27];
    - 2.6. Оценка устойчивости новых конструктивных систем [34];
    - 2.7. Аналитические предпосылки к оценке устойчивости [35].
  3. Численные и экспериментальные исследования новых узловых соединений для ПСМК (в том числе тонкостенные) [7, 5, 23–24, 26, 30, 39]:
    - 3.1. Оценка влияния Х-образных тонкостенных соединений [42];
    - 3.2. Численные и экспериментальные исследования тонкостенных оболочек с полужесткими узлами [32].
- Суммируя данные, можно сделать следующие выводы о полученных опытным путем данных:
- в разрезе узловых элементов – решены локальные задачи по влиянию конструктивных исполнений шаровых коннекторов и крепежных элементов, их влияние на напряженно-деформированное состояние узлов и даны локальные рекомендации по улучшению конструктивных решений узлов во избежание концентраторов напряжений и учету пластичности на концах соединений;
  - в части анализа устойчивости дана оценка коэффициента запаса устойчивости однопоясной решетчатой конструкции (купола) типа

TRIODETIK с оценкой конкретной жесткости узлового соединения в рамках оценки НДС реального объекта;

- предложены методы моделирования полужестких соединений пружинами для оценки поворотной жесткости в классических КЭ-схемах;
  - проведена оценка жесткости перекрестных ферм в зависимости от начальных несовершенств;
  - Предложены некоторые кривые потери устойчивости для ГСП-стержней с композитными (и алюминиевыми) материалами в составе конструкции ферм;
  - в части численных и экспериментальных исследований представлена оценка влияния Х-образного соединения тонкостенных соединений в составе однопоясной оболочки;
  - проведена численная и экспериментальная оценка НДС тонкостенных оболочек с полужесткими узлами.
- Однако, исходя из изложенного следует подробно остановиться на том, какие позиции еще требуют дополнительных исследований и уточнений:
- отсутствует системная оценка жесткости узловых соединений для ПСМК;
  - не разработаны закономерности изменения конструктивных решений и их влияния на НДС элементов узловых соединений;
  - конструктивные решения для использования ГСП в составе двухпоясных оболочек и структурных покрытий не являются апробированными – в частности отсутствуют экспериментальные исследования оценки НДС узловых и стержневых элементов из ГСП в составе покрытия (как минимум в 2-х и более ячейках модели покрытия);
  - отсутствует анализ устойчивости стержней ГСП в составе однопоясных и двухпоясных оболочек;
  - отсутствует оценка влияния жесткости узловых соединений на характер потери устойчивости стержней в составе ПСМК и ТПСМК.

### Общие выводы

1. Выполнен критический анализ направлений исследования в разрезе проектирования пространственных стержневых металлических конструкций. Выявлено, что конструктивные

решения для использования ГСП в составе двухпоясных оболочек и структурных покрытий не являются апробированными – в частности отсутствуют экспериментальные исследования оценки НДС узловых и стержневых элементов из ГСП в составе покрытия (как минимум в 2-х и более ячейках модели покрытия).

2. Выполнен критический анализ существующих методов. Предлагается для дальнейшего проведения численных исследований использовать верифицированный программный комплекс ПА ЛИРА-САПР, позволяющий решать задачи и в части уточненного и упрощенного конечно-элементного моделирования.

### Список источников

1. Rotational Stiffness Investigation and Parametric Analysis of a Novel Assembled Joint in Lattice Shells / J. Xu, Y. Zhu, J. Wu, [et al.]. – DOI: 10.3390/buildings14010261. – Текст : электронный // Buildings. – 2024. – Volume 14(1), № 261. – P. 1–17. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/37747-1915> (дата обращения: 10.06.2024).
2. Zhu, N. Multiobjective Topology Optimization of Spatial-Structure Joints / N. Zhu, J. Liu. – DOI: 10.1155/2021/5530644. – Текст : электронный // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Volume 2021, Article ID 5530644. – P. 1–13. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/350828932\\_Multiobjective\\_Topology\\_Optimization\\_of\\_Spatial-Structure\\_Joints](https://www.researchgate.net/publication/350828932_Multiobjective_Topology_Optimization_of_Spatial-Structure_Joints) (дата обращения: 10.06.2024).
3. Han, Q. Study on the Assembled Hub joints in single-layer reticulated domes / Q. Han, Y. Liu, Y. Xu. – Текст : непосредственный // Interfaces: Architecture. Engineering. Science. – 2017. – Volume 2017, № 3. – P. 1–8.
4. Investigating the effect of screw size on the stress level in mero joint for space frame structures / Y. Doaei, S. E. A. Hosseini, A. Momenzadeh [et al.]. – DOI: 10.3390/asi4040084. – Текст : электронный // Applied System Innovation. – 2021. – Volume 4(4), № 84. – P. 1–16. – URL: <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/4/84> (дата обращения: 23.06.2024).
5. Effect of insufficient screwing depth of bolt on mechanical behavior of bolt-ball joint and stability of single-layer reticulated shell / Q. Wu, H. Wang, H. Qian [et al.]. – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110590. – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2020. – Volume 213. – P. 1–11. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.engstruct.2020.110590> (дата обращения: 01.06.2024).
6. Liu, F. Form finding of assembled lattice structure considering the effect of joint stiffness / F. Liu, R. Feng, K. D. Tsavdaridis. – DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.02.026. – Текст : электронный // Structures. – 2021. – Volume 31. – P. 1096–1105. – URL: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/27949/> (дата обращения: 01.06.2024).
7. Experimental and numerical studies on a new type of bolt-ball joint for spatial grid structures / D. Yang, M. Li,

### References

1. Xu, J.; Zhu, Y.; Wu, J. [et al.]. Rotational Stiffness Investigation and Parametric Analysis of a Novel Assembled Joint in Lattice Shells. – Text : electronic. – In: *Buildings*. – 2024. – Volume 14(1), № 261. – P. 1–17. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/377471915> (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.3390/buildings14010261.
2. Zhu, N.; Liu, J. Multiobjective Topology Optimization of Spatial-Structure Joints. – Text : electronic. – In: *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Volume 2021, Article ID 5530644. – P. 1–13. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/350828932\\_Multiobjective\\_Topology\\_Optimization\\_of\\_Spatial-Structure\\_Joints](https://www.researchgate.net/publication/350828932_Multiobjective_Topology_Optimization_of_Spatial-Structure_Joints) (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.1155/2021/5530644.
3. Han, Q.; Liu, Y.; Xu, Y. Study on the Assembled Hub joints in single-layer reticulated domes. – Text : direct. – In: *Interfaces: Architecture. Engineering. Science*. – 2017. – Volume 2017, № 3. – P. 1–8.
4. Doaei, Y.; Hosseini, S. E. A.; Momenzadeh, A. [et al.]. Investigating the effect of screw size on the stress level in mero joint for space frame structures. – Text : electronic. – In: *Applied System Innovation*. – 2021. – Volume 4(4), № 84. – P. 1–16. – URL: <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/4/84> (date of access: 23.06.2024). – DOI: 10.3390/asi4040084.
5. Wu, Q.; Wang, H.; Qian, H. [et al.]. Effect of insufficient screwing depth of bolt on mechanical behavior of bolt-ball joint and stability of single-layer reticulated shell. – Text : electronic. – In: *Engineering Structures*. – 2020. – Volume 213. – P. 1–11. – URL: <https://www.scihub.ru/10.1016/j.engstruct.-2020.110590> (date of access: 01.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110590.
6. Liu, F.; Feng, R.; Tsavdaridis, K. D. Form finding of assembled lattice structure considering the effect of joint stiffness. – Text : electronic. – In: *Structures*. – 2021. – Volume 31. – P. 1096–1105. – URL: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/27949/> (date of access: 01.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.02.026.
7. Yang, D.; Li, M.; Fu, F. [et al.]. Experimental and numerical studies on a new type of bolt-ball joint for spatial grid structures. – Text : electronic. – In: *Journal of Constructional Steel Research*. – 2020. –

- F. Fu [et al.]. – DOI: 10.1016/J.JC-SR.2021.107035. – Текст : электронный // Journal of Constructional Steel Research. – 2020. – Volume 188. – P. 1–30. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X21005162?via%3Dihub> (дата обращения: 24.07.2024).
8. Buckling analysis and stability of compressed low-carbon steel rods in the elastoplastic region of materials / G. Partskhaladze, I. Mshvenieradze, E. Medzmarishvili [et al.]. – DOI: 10.1155/2019/-7601260. – Текст : электронный // Advances in Civil Engineering. – 2019. – Volume 2019, Article ID 7601260. – P. 1–9. – URL: <https://www.semanticscholar.org/reader/7b7a4e47077eb56def1ddc36b4bb61d1d2f7b612> (дата обращения: 01.06.2024).
  9. Local Buckling of Axially Compressed Welded H-Section Stub Columns Using Q420–Q960 Steel / J. Wang, J. Di, Q. Zhang [et al.]. – DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-12107. – Текст : электронный // Journal of Structural Engineering. – 2023. – Volume 149, № 9. – P. 1–17. – URL: <https://structurae.net/en/literature/journal-article/local-buckling-of-axially-compressed-welded-h-section-stub-columns-using-q420-q960-steel> (дата обращения: 10.06.2024).
  10. Local buckling of 800 MPa high strength steel welded T-section columns under axial compression / X. Cao, L. Gu, Z. Kong [et al.]. – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.05.060. – Текст : электронный // Engineering Structures. – 2019. – Volume 194. – P. 196–206. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029618342615?via%3Dihub> (дата обращения: 10.06.2024).
  11. Jindra, D. Buckling curves of stainless steel CHS members: Current state and proposed provisions / D. Jindra, Z. Kala, J. Kala. – DOI: 10.1016/j.jc-sr.2022.107521. – Текст : электронный // Journal of Constructional Steel Research. – 2022. – Volume 198. – P. 1–17. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/363349319\\_Buckling\\_curves\\_of\\_stainless\\_steel\\_CHS\\_members\\_Current\\_state\\_and\\_proposed\\_provisions](https://www.researchgate.net/publication/363349319_Buckling_curves_of_stainless_steel_CHS_members_Current_state_and_proposed_provisions) (дата обращения: 10.06.2024).
  12. Meng, X. Behavior and Design of Normal- and High-Strength Steel SHS and RHS Columns / X. Meng, L. Gardner. – DOI: 10.1061/(asce)st.1943541x.0002728. – Текст : электронный // Journal of Structural Engineering. – 2020. – Volume 146, № 11. – P. 1–14. – URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002728](https://www.sci-hub.ru/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002728) (дата обращения: 10.06.2024).
  13. Mechanical behavior of locally corroded circular steel tube under compression / Y. Wei, Z. Wu, X. Wang [et al.]. – DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.063. – Текст : электронный // Structures. – 2021. – Volume 33. – P. 776–791. – URL: <https://www.scihub.ru/10.1016/j.istruc.2021.04.063> (дата обращения: 25.06.2024).
  14. Hoang, T. New transverse extension modes for buckling analysis of thin-walled members by using the constrained finite strip method / T. Hoang, S. Adany. – DOI: 10.1016/j.tws.2022.109634. – Volume 188. – P. 1–30. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X21005162?via%3Dihub> (date of access: 24.07.2024). – DOI: 10.1016/J.JCSR.2021.107035.
  8. Partskhaladze, G.; Mshvenieradze, I.; Medzmarishvili, E. [et al.]. Buckling analysis and stability of compressed low-carbon steel rods in the elastoplastic region of materials. – Text : electronic. – In: *Advances in Civil Engineering*. – 2019. – Volume 2019, Article ID 7601260. – P. 1–9. – URL: <https://www.semanticscholar.org/reader/7b7a4e47077eb56def1ddc36b4bb61d1d2f7b612> (date of access: 01.06.2024). – DOI: 10.1155/2019/7601260.
  9. Wang, J.; Di, J.; Zhang, Q. [et al.]. Local Buckling of Axially Compressed Welded H-Section Stub Columns Using Q420–Q960 Steel. – Text : electronic. – In: *Journal of Structural Engineering*. – 2023. – Volume 149, № 9. – P. 1–17. – URL: <https://structurae.net/en/literature/journal-article/local-buckling-of-axially-compressed-welded-h-section-stub-columns-using-q420-q960-steel> (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-12107.
  10. Cao, X.; Gu, L.; Kong, Z. [et al.]. Local buckling of 800 MPa high strength steel welded T-section columns under axial compression. – Text : electronic. – In: *Engineering Structures*. – 2019. – Volume 194. – P. 196–206. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029618342615?via%3Dihub> (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.05.060.
  11. Jindra, D.; Kala, Z.; Kala, J. Buckling curves of stainless steel CHS members: Current state and proposed provisions. – Text : electronic. – In: *Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – Volume 198. – P. 1–17. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/363349319\\_Buckling\\_curves\\_of\\_stainless\\_steel\\_CHS\\_members\\_Current\\_state\\_and\\_proposed\\_provisions](https://www.researchgate.net/publication/363349319_Buckling_curves_of_stainless_steel_CHS_members_Current_state_and_proposed_provisions) (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.1016/j.jc-sr.2022.107521.
  12. Meng, X.; Gardner, L. Behavior and Design of Normal- and High-Strength Steel SHS and RHS Columns. – Text : electronic. – In: *Journal of Structural Engineering*. – 2020. – Volume 146, № 11. – P. 1–14. – URL: [https://www.scihub.ru/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002728](https://www.scihub.ru/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002728) (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002728.
  13. Wei, Y.; Wu, Z.; Wang, X. [et al.]. Mechanical behavior of locally corroded circular steel tube under compression. – Text : electronic. – In: *Structures*. – 2021. – Volume 33. – P. 776–791. – URL: <https://www.scihub.ru/10.1016/j.istruc.2021.04.063> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.063.
  14. Hoang, T.; Adany, S. New transverse extension modes for buckling analysis of thin-walled members by using the constrained finite strip. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2022. – Volume 179. – P. 1–15. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/352484218\\_New\\_Transverse\\_Extension\\_Modes\\_for\\_the\\_Constrained\\_Finite\\_Strip\\_Analysis\\_of\\_Thin-walled\\_Members](https://www.researchgate.net/publication/352484218_New_Transverse_Extension_Modes_for_the_Constrained_Finite_Strip_Analysis_of_Thin-walled_Members)

- Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2022. – Volume 179. – P. 1–15. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/352484218\\_New\\_Transverse\\_Extension\\_Modes\\_for\\_the\\_Constrained\\_Finite\\_Strip\\_Analysis\\_of\\_Thin-walled\\_Members](https://www.researchgate.net/publication/352484218_New_Transverse_Extension_Modes_for_the_Constrained_Finite_Strip_Analysis_of_Thin-walled_Members) (дата обращения: 25.06.2024).
15. Meng, X. Testing of hot-finished high strength steel SHS and RHS under combined compression and bending / X. Meng, L. Gardner. – DOI: 10.1016/j.tws.2019.106262. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2020. – Volume 148. – P. 1–27. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/344574148\\_Testing\\_of\\_hotfinished\\_high\\_stren-gth\\_steel\\_SHS\\_and\\_RHS\\_under\\_combined\\_compression\\_and\\_bending](https://www.researchgate.net/publication/344574148_Testing_of_hotfinished_high_stren-gth_steel_SHS_and_RHS_under_combined_compression_and_bending) (дата обращения: 25.06.2024).
  16. Shahraki, M. Structural behaviors of strengthened deficient steel square hollow section columns under axial compressive loads / M. Shahraki, H. M. Darmiyan. – DOI: 10.1007/s41062-022-00955-0. – Текст : электронный // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2023. – Volume 8, № 1. – P. 1–14. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-022-00955-0> (дата обращения: 01.07.2024).
  17. Analysis of stress-strain in the partial heating roll forming process of high strength square hollow steel sections / Z. A. Mehari, J. Han, X. Peng [et al.]. – DOI: 10.1007/s00170-021-07126-y. – Текст : электронный // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – Volume 115, № 1–2. – P. 563–579. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07126-y> (дата обращения: 01.07.2024).
  18. Sato, T. Local buckling performance of steel thin square hollow section at high temperature / T. Sato, F. Ozaki. – DOI: 10.3130/aijs.83.1381. – Текст : электронный // *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. – 2018. – Volume 83, Issue 751. – P. 1381–1389. – URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/83/751/83\\_1381/\\_article/char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/83/751/83_1381/_article/char/en) (дата обращения: 10.06.2024).
  19. Experimental and numerical study of notched SHS made of different S355 steels / H. Johannessen, O. H. Johannessen, M. Costas [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106673. – Текст : электронный // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2021. – Volume 182. – P. 1–14. – URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11-250/2772590/1-s2.0-S0143974X21001541main.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (дата обращения: 23.06.2024).
  20. Wang, X. Research on ultimate bearing capacity of cold-formed steel square hollow sections / X. Wang, X. Cheng, F. Liao. – Текст : непосредственный // *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*. – 2021. – Volume 53, № 3. – P. 1–16.
  21. Zhou, F. Cold-formed stainless steel SHS and RHS columns subjected to local-flexural interactive buckling / F. Zhou, L. Huang, H. T. Li. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106999. – Текст : электронный // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/j.tws.2022.109634.
  15. Meng, X.; Gardner, L. Testing of hot-finished high strength steel SHS and RHS under combined compression and bending / X. Meng, L. Gardner. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2020. – Volume 148. – P. 1–27. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/344574148\\_Testing\\_of\\_hotfinished\\_high\\_strength\\_steel\\_SHS\\_and\\_RHS\\_under\\_combined\\_compression\\_and\\_bending](https://www.researchgate.net/publication/344574148_Testing_of_hotfinished_high_strength_steel_SHS_and_RHS_under_combined_compression_and_bending) (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/j.tws.2019.106262.
  16. Shahraki, M.; Darmiyan, H. M. Structural behaviors of strengthened deficient steel square hollow section columns under axial compressive loads. – Text : electronic. – In: *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2023. – Volume 8, № 1. – P. 1–14. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-022-00955-0> (date of access: 01.07.2024). – DOI: 10.1007/s41062-022-00955-0.
  17. Mehari, Z. A.; Han, J.; Peng, X. [et al.]. Analysis of stress-strain in the partial heating roll forming process of high strength square hollow steel sections. – Text : electronic. – In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – Volume 115, № 1–2. – P. 563–579. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07126-y> (date of access: 01.07.2024). – DOI: 10.1007/s00170-021-07126-y.
  18. Sato, T.; Ozaki, F. Local buckling performance of steel thin square hollow section at high temperature. – Text : electronic. – In: *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. – 2018. – Volume 83, Issue 751. – P. 1381–1389. – URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/83/751/83\\_1381/\\_article/char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/83/751/83_1381/_article/char/en) (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.3130/aijs.83.1381.
  19. Johannessen, H.; Johannessen, O. H.; Costas, M. [et al.]. Experimental and numerical study of notched SHS made of different S355 steels. – Text : electronic. – In: *Journal of Constructional Steel Research*. – 2021. – Volume 182. – P. 1–14. – URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2772590/1-s2.0S0143974X21001541-main.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (date of access: 23.06.2024). – DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106673.
  20. Wang, X.; Cheng, X.; Liao, F. Research on ultimate bearing capacity of cold-formed steel square hollow sections. – Text : direct. – In: *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*. – 2021. – Volume 53, № 3. – P. 1–16.
  21. Zhou, F.; Huang, L.; Li, H. T. Cold-formed stainless steel SHS and RHS columns subjected to local-flexural interactive buckling. – Text : electronic. – In: *Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – Volume 188. – P. 1–14. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X21004818> (date of access: 23.06.2024). – DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106999.
  22. Yan, X.; Gernay, T. Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. – Text : electronic. – In:

- Volume 188. – P. 1–14. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X21004818> (дата обращения: 23.06.2024).
22. Yan, X. Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures / X. Yan, T. Gernay. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107403. – Текст : электронный // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – Volume 196. – P. 1–5. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X22002759?via%3Dihub> (дата обращения: 25.06.2024).
23. Pandey, M. Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems / M. Pandey, B. Young. – Текст : непосредственный // *Behaviour of cold-formed high strength steel tubular X-joints with circular braces and rectangular chords : The 8th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC), South Africa, 2022*. – P. 1172–1177.
24. Form-finding and structural shape optimization of the metal 3D-printed multi-branch node with complex geometry / V. Hassani, Z. Khabazi, F. Raspall [et al.]. – DOI: 10.14733/cadaps.2020.205-225. – Текст : электронный // *Computer-Aided Design and Applications*. – 2020. – Volume 17(1). – P. 205–225. – URL: [https://www.cad-journal.net/files/vol\\_17/CAD\\_17\(1\)\\_2020\\_205-225.pdf](https://www.cad-journal.net/files/vol_17/CAD_17(1)_2020_205-225.pdf) (дата обращения: 05.07.2024).
25. Tomei, V. The effect of joint stiffness on optimization design strategies for gridshells: The role of rigid, semirigid and hinged joints / V. Tomei. – DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2022.12.096. – Текст : электронный // *Structures*. – 2023. – Volume 48. – P. 147–158. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235201242201284X?via%3Dihub> (дата обращения: 25.06.2024).
26. Ma, H. Experimental and numerical research on a new semi-rigid joint for single-layer reticulated structures / H. Ma, S. Ren, F. Fan. – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.08.028. – Текст : электронный // *Engineering Structures*. – 2016. – Volume 126. – P. 725–738. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029616304291?via%3Dihub> (дата обращения: 25.06.2024).
27. Static stability analysis of steel single-layer spherical latticed shells with and without roofing systems / W. A. H. Mashrah, B. Rima, H. Liu [et al.]. – DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.107141. – Текст : электронный // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Volume 77. – P. 1–8. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223013219?via%3Dihub> (дата обращения: 25.06.2024).
28. Zhao, Z. Novel numerical method for the analysis of semi-rigid jointed lattice shell structures considering plasticity / Z. Zhao, H. Liu, B. Liang. – DOI: 10.1016/J.ADVENGSOFT.2017.07.005. – Текст : электронный // *Advances in Engineering Software*. – 2017. – Volume 114. – P. 208–214. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>
- Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – Volume 196. – P. 1–5. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X22002759?via%3Dihub> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107403.
23. Pandey, M.; Young, B. Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems. – Text : direct. – In: *Behaviour of cold-formed high strength steel tubular X-joints with circular braces and rectangular chords : The 8th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC), South Africa, 2022*. – P. 1172–1177.
24. Hassani, V.; Khabazi, Z.; Raspall, F. [et al.]. Form-finding and structural shape optimization of the metal 3D-printed multi-branch node with complex geometry. – Text : electronic. – In: *Computer-Aided Design and Applications*. – 2020. – Volume 17(1). – P. 205–225. – URL: [https://www.cad-journal.net/files/vol\\_17\\_CAD\\_17\(1\)\\_2020\\_205-225.pdf](https://www.cad-journal.net/files/vol_17_CAD_17(1)_2020_205-225.pdf) (date of access: 05.07.2024). – DOI: 10.14733/cadaps.2020.205-225.
25. Tomei, V. The effect of joint stiffness on optimization design strategies for gridshells: The role of rigid, semi-rigid and hinged joints. – Text : electronic. – In: *Structures*. – 2023. – Volume 48. – P. 147–158. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235201242201284X?via%3Dihub> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2022.12.096.
26. Ma, H.; Ren, S.; Fan, F. Experimental and numerical research on a new semi-rigid joint for single-layer reticulated structures. – Text : electronic. – In: *Engineering Structures*. – 2016. – Volume 126. – P. 725–738. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029616304291?via%3Dihub> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.08.028.
27. Mashrah, W. A. H.; Rima, B.; Liu, H. [et al.]. Static stability analysis of steel single-layer spherical latticed shells with and without roofing systems. – Text : electronic. – In: *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Volume 77. – P. 1–8. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223013219?via%3Dihub> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.107141.
28. Zhao, Z.; Liu, H.; Liang, B. Novel numerical method for the analysis of semi-rigid jointed lattice shell structures considering plasticity. – Text : electronic. – In: *Advances in Engineering Software*. – 2017. – Volume 114. – P. 208–214. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997817302363?via%3Dihub> (date of access: 10.06.2024). – DOI: 10.1016.J.ADVENGSOFT.2017.07.005.
29. Liu, Y.; Lee, T. U.; Koronaki, A. [et al.]. Reducing the number of different nodes in space frame structures through clustering and optimization. – Text : electronic. – In: *Engineering Structures*. – 2023. – Volume 284. – P. 1–10. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014102962->

- abs/pii/S0965997817302363?via%3Dihub (дата обращения: 10.06.2024).
29. Reducing the number of different nodes in space frame structures through clustering and optimization / Y. Liu, T. U. Lee, A. Koronaki [et al.]. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116016. – Текст : электронный // *Engineering Structures*. – 2023. – Volume 284. – P. 1–10. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623004303?via%3Dihub> (дата обращения: 01.07.2024).
  30. Mechanical performance of AH joints and influence on the stability behaviour of single-layer cylindrical shells / Q. Han, C. Wang, Y. Xu. – DOI: 10.1016/J.TWS.2019.106459. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2020. – Volume 146. – P. 1–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823119308559?via%3Dihub> (дата обращения: 25.06.2024).
  31. Lopez, A. Experimental and analytical studies on the rotational stiffness of joints for single-layer structures / A. Lopez, I. Puente, H. Aizpurua. – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.11.023. – Текст : электронный // *Engineering Structures*. – 2011. – Volume 33, № 3. – P. 731–737. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.engstruct.2010.11.023?ysclid=Izsa1syqb5183322623> (дата обращения: 25.06.2024).
  32. Experimental and numerical studies on a single-layer cylindrical reticulated shell with semi-rigid joints / H. Ma, F. Fan, P. Wen [et al.]. – DOI: 10.1016/J.TWS.2014.08.006. – Текст : электронный // *Thin-Walled Structures*. – 2015. – Volume 86. – P. 1–9. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823114002407?via%3Dihub> (дата обращения: 01.07.2024).
  33. Experimental and theoretical analyses on semirigid pin joints under in-plane direction bending in modular reticulated shell / A. L. Zhang, C. Li, Y. X. Zhang [et al.]. – DOI: 10.1016/J.JCSR.2021.107128. – Текст : электронный // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – Volume 190. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X21006118?via%3Dihub> (дата обращения: 01.07.2024).
  34. Jin, J. L. Study on buckling characteristics of cylindrical and domed 1,5-layer space frames with lap-units / J. L. Jin, X. X. Qian, P. S. Chen. – Текст : непосредственный // *Journal of Structural Engineering*. – 2021. – Volume 67. – P. 251–260.
  35. Kala, Z. Strain Energy and Entropy Based Scaling of Buckling Modes / Z. Kala. – DOI: 10.3390/e25121630. – Текст : электронный // *Entropy*. – 2023. – Volume 25, № 12. – P. 1–17. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/376291155\\_Strain\\_Energy\\_and\\_Entropy\\_Based\\_Scaling\\_of\\_Buckling\\_Modes](https://www.researchgate.net/publication/376291155_Strain_Energy_and_Entropy_Based_Scaling_of_Buckling_Modes) (дата обращения: 05.07.2024).
  36. Kala, Z. Large Displacement Analysis of Elastic Pyramidal Trusses / Z. Kala. – DOI: 10.1088/1757-899X/471/10/102054. – Текст : электронный // *IOP Conference Series: Materials Science* 3004303?via%3Dihub (date of access: 01.07.2024). – DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116016.
  30. Han, Q.; Wang, C.; Xu, Y. Mechanical performance of AH joints and influence on the stability behaviour of single-layer cylindrical shells. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2020. – Volume 146. – P. 1–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823119308559?via%3Dihub> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/J.TWS.2019.106459.
  31. Lopez, A.; Puente, I.; Aizpurua, H. Experimental and analytical studies on the rotational stiffness of joints for single-layer structures. – Text : electronic. – In: *Engineering Structures*. – 2011. – Volume 33, № 3. – P. 731–737. – URL: <https://www.scihub.ru/10.1016j.engstruct.2010.11.023?ysclid=Izsa1syqb5183322623> (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.11.023.
  32. Ma, H.; Fan, F.; Wen, P. [et al.]. Experimental and numerical studies on a single-layer cylindrical reticulated shell with semi-rigid joints. – Text : electronic. – In: *Thin-Walled Structures*. – 2015. – Volume 86. – P. 1–9. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823114002407?via%3Dihub> (date of access: 01.07.2024). – DOI: 10.1016/J.TWS.2014.08.006.
  33. Zhang, A. L.; Li, C.; Zhang, Y. X. [et al.]. Experimental and theoretical analyses on semi-rigid pin joints under in-plane direction bending in modular reticulated shell. – Text : electronic. – In: *Journal of Constructional Steel Research*. – 2022. – Volume 190. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X21006118?via%3Dihub> (date of access: 01.07.2024). – DOI: 10.1016/J.JCSR.2021.107128.
  34. Jin, J. L.; Qian, X. X.; Chen, P. S. Study on buckling characteristics of cylindrical and domed 1.5-layer space frames with lap-units. – Text : direct. – In: *Journal of Structural Engineering*. – 2021. – Volume 67. – P. 251–260.
  35. Kala, Z. Strain Energy and Entropy Based Scaling of Buckling Modes. – Text : electronic. – In: *Entropy*. – 2023. – Volume 25, № 12. – P. 1–17. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/376291155\\_Strain\\_Energy\\_and\\_Entropy\\_Based\\_Scaling\\_of\\_Buckling\\_Modes](https://www.researchgate.net/publication/376291155_Strain_Energy_and_Entropy_Based_Scaling_of_Buckling_Modes) (date of access: 05.07.2024). – DOI: 10.3390/e25121630.
  36. Kala, Z. Large Displacement Analysis of Elastic Pyramidal Trusses. – Text : electronic. – In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Volume 471. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/331304009\\_Large\\_Displacement\\_Analysis\\_of\\_Elastic\\_Pyramidal\\_Trusses](https://www.researchgate.net/publication/331304009_Large_Displacement_Analysis_of_Elastic_Pyramidal_Trusses) (date of access: 18.07.2024). – DOI: 10.1088/1757-899X/471/10/102054.
  37. Beutler, P.; Biedermann, M.; Hofmann, U. [et al.]. Automated Design Workflow for Structural Nodes of Space Frame Structures. – Text : electronic. – In: *Procedia CIRP*. – 2022. – Volume 109. – P. 419–424. – URL: <https://www.researchgate.net/>

- and Engineering. – 2019. – Volume 471. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/33130-4009\\_Large\\_Displacement\\_Analysis\\_of\\_Elastic\\_Pyramidal\\_Trusses](https://www.researchgate.net/publication/33130-4009_Large_Displacement_Analysis_of_Elastic_Pyramidal_Trusses) (дата обращения: 18.07.2024).
37. Automated Design Workflow for Structural Nodes of Space Frame Structures / P. Beutler, M. Biedermann, U. Hofmann [et al.]. – DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.272. – Текст : электронный // Procedia CIRP. – 2022. – Volume 109. – P. 419–424. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/361467686\\_Automated\\_Design\\_Workflow\\_for\\_Structural\\_Nodes\\_of\\_Space\\_Frame\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/361467686_Automated_Design_Workflow_for_Structural_Nodes_of_Space_Frame_Structures) (дата обращения: 01.07.2024).
  38. Файбишенко, В. К. Экспериментально-теоретические исследования перекрестно-ребристых конструкций квадратных в плане при различных вариантах опирания : специальность 05.00.00 «Техника» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Файбишенко Вячеслав Константинович ; Московский архитектурный институт. – Москва, 1967. – 22 с. – Текст : непосредственный.
  39. Stability of spatial structural elements: the influence of actual modeling / V. F. Mushchanov, A. V. Mushchanov, M. N. Tsepliaev [et al.]. – DOI: 10.4123/CUBS.109.17. – Текст : электронный // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2023. – Volume 109. – P. 1–22. – URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2023/4\(109\)/10917.pdf?ysclid=lzstakyn6283445256](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2023/4(109)/10917.pdf?ysclid=lzstakyn6283445256) (дата обращения: 25.06.2024). – ISSN 2304-6295.
  40. Особенности формирования уточненных расчетных схем при анализе напряженно-деформированного состояния, оценке устойчивости и надежности элементов пространственных металлических конструкций / В. Ф. Мушанов, А. Н. Оржеховский, М. Н. Цепляев [и др.]. – Текст : электронный // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений. – 2023. – Тамбов, 2023. – С. 238–239. – URL: [https://www.research-gate.net/publication/375675631\\_Osobennosti\\_formirovaniya\\_utocnennyh\\_rascetnyh\\_shem\\_pri\\_analize\\_naprazennodeformirovannogo\\_sostoania\\_ocenke\\_ustojcivosti\\_i\\_nadeznosti\\_elementov\\_prostranstvennyh\\_metallicheskih\\_konstrukcij](https://www.research-gate.net/publication/375675631_Osobennosti_formirovaniya_utocnennyh_rascetnyh_shem_pri_analize_naprazennodeformirovannogo_sostoania_ocenke_ustojcivosti_i_nadeznosti_elementov_prostranstvennyh_metallicheskih_konstrukcij) (дата обращения: 25.06.2024).
  41. Romenskiy, I. V. The Main Approaches To the Appointment of Spatial and Stiffness Characteristics of the Marchi System Roofs When Regulating the Parameters of Its Stress Strain / I. V. Romenskiy, T. I. Zagoruiko, A. V. Mushchanov. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2015. – Том 21, № 1. – С. 5–14.
  42. Мушанов, А. В. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия / А. В. Мушанов, В. Ф. Мушанов, И. В. Роменский. – Текст : электронный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 2(41). – С. 18–29. – URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/publication/361467686\\_Automated\\_Design\\_Workflow\\_for\\_Structural\\_Nodes\\_of\\_Space\\_Frame\\_Structures](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/publication/361467686_Automated_Design_Workflow_for_Structural_Nodes_of_Space_Frame_Structures) (date of access: 01.07.2024). – DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.272.
  43. Faibishenko, V. K. Experimental and theoretical studies of cross-ribbed structures square in plan with different support options : specialty 05.00.00 «Engineering» : abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Faibishenko Vyacheslav ; Moscow Architectural Institute. – Moscow, 1967. – 22 p. – Text : direct. (in Russian)
  39. Mushchanov, V. F.; Mushchanov, A. V.; Tsepliaev, M. N. [et al.]. Stability of spatial structural elements: the influence of actual modeling. – Text : electronic. – In: *Construction of Unique Buildings and Structures.* – 2023. – Volume 109. – P. 1–22. – URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2023/4\(109\)/10917.pdf?ysclid=lzstakyn6283445256](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2023/4(109)/10917.pdf?ysclid=lzstakyn6283445256) (date of access: 25.06.2024). – DOI: 10.4123/CUBS.109.17. – ISSN 2304-6295.
  40. Mushchanov, V. F.; Orzhehovsky, A. N.; Tsepliaev, M. N. [et al.]. Features of the formation of refined design schemes in the analysis of stress-strain state, assessment of stability and reliability of elements of spatial metal structures. – Text : electronic. – In: *Actual problems of computer modeling in civil engineering.* – 2023. – Tambov, 2023. – P. 238–239. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/375675631\\_Osobennosti\\_formirovaniya\\_utocnennyh\\_rascetnyh\\_shem\\_pri\\_analize\\_naprazennodeformirovannogo\\_sostoania\\_ocenke\\_ustojcivosti\\_i\\_nadeznosti\\_elementov\\_prostranstvennyh\\_metallicheskih\\_konstrukcij](https://www.researchgate.net/publication/375675631_Osobennosti_formirovaniya_utocnennyh_rascetnyh_shem_pri_analize_naprazennodeformirovannogo_sostoania_ocenke_ustojcivosti_i_nadeznosti_elementov_prostranstvennyh_metallicheskih_konstrukcij) (date of access: 25.06.2024). (in Russian)
  41. Romenskiy, I. V.; Zagoruiko, T. I.; Mushchanov, A. V. The Main Approaches To the Appointment of Spatial and Stiffness Characteristics of the Marchi System Roofs When Regulating the Parameters of Its Stress Strain. – Text : direct. – In: *Metal Constructions.* – 2015. – Volume 21, № 1. – P. 5–14.
  42. Mushchanov, A. V.; Mushchanov, V. F.; Romenskiy, I. V. Rational geometric and stiffness parameters of long-span structural roof. – Text : electronic. – In: *Construction of Unique Buildings and Structures.* – 2016. – № 2(41). – P. 18–29. – URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/2\(41\)/2\\_mushchanov\\_41.pdf?ysclid=lzsf26rj6y913663707](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/2(41)/2_mushchanov_41.pdf?ysclid=lzsf26rj6y913663707) (date of access: 10.06.2024). (in Russian)
  43. Mushchanov, A. V.; Mushchanov, V. F.; Romenskiy, I. V. The impact of support on the compliance of the stress-strain state of structural elements covering. – Text : electronic. – In: *Construction of Unique Buildings and Structures.* – 2016. – № 1(40). – P. 7–19. – URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/1\(40\)/1\\_mushchanov\\_40.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/1(40)/1_mushchanov_40.pdf) (date of access: 10.06.2024).
  44. Gorokhov, E. V.; Vasylev, V. N.; Mushchanov, A. V. [et al.]. Experimental Study of the Influence of Node Joints of Structural Structures on the Stability of Central Compressed Rods. – Text : electronic. – In:

- 2016/2(41)/2\_muschanov\_41.pdf?ysclid=-lzs26rj6y913663707 (дата обращения: 10.06.2024).
43. Мущанов, А. В. Влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние элементов структурного покрытия / А. В. Мущанов, В. Ф. Мущанов, И. В. Роменский. – Текст : электронный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 1(40). – С. 7–19. – URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/1\(40\)/1\\_muschanov\\_40.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/1(40)/1_muschanov_40.pdf) (дата обращения: 10.06.2024).
44. Экспериментальное исследование влияния узловых соединений структурных конструкций на устойчивость центрально-сжатых стержней / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, А. В. Мущанов [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2020. – Том 26, № 2. – С. 87–101. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2020-2/04\\_horokhov\\_vasylev\\_mushchanov\\_volchkov.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-2/04_horokhov_vasylev_mushchanov_volchkov.pdf) (дата обращения: 14.07.2024).
- Metal Constructions.* – 2020. – Volume 26, № 2. – P. 87–101. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2020-2/04\\_horokhov\\_vasylev\\_mushchanov\\_volchkov.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-2/04_horokhov_vasylev_mushchanov_volchkov.pdf) (date of access: 14.07.2024). (in Russian)

### Информация об авторах

**Горохов Евгений Васильевич** – доктор технических наук, профессор, почетный президент; заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Иностраный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

**Мущанов Владимир Филиппович** – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики; проректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Член международной организации Институт гражданских инженеров и международной ассоциации Пространственные конструкции. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Мущанов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, доцент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Сотрудник организации Бау Проект, Краснодарский край, Краснодар, Россия. Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

**Капустин Павел Андреевич** – заместитель генерального директора Строительной Компании Велесъ, Московская область, Апрелевка, Россия. Научные интересы: работа пространственных стержневых конструкций больших пролетных покрытий с элементами из гнutosварных профилей.

### Information about the authors

**Gorokhov Yevgen V.** – D. Sc. (Eng.), Professor, Honorary President; Head of the Department the Head of the Metal Structures and Constructions, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Civil Engineering of Ukraine, Member of the International Committee of study of wind effects on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

**Mushchanov Vladimir F.** – D. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; Vice-Rector Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. A member of the international organization Institute of Civil Engineer and international organization of Spatial Structures. Scientific interests: reliability theory, calculation, design and technical diagnostics of spatial metal structures.

**Muschanov Alexander V.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Employee of the organization Bau Project, Krasnodar Region, Krasnodar, Russia. Scientific interests: calculation and design of spatial metal structures.

**Kapustin Pavel A.** – Deputy General Director of the Veles Construction Company, Moscow Region, Aprelevka, Russia. Research interests: operation of spatial rod structures of large-span roofs with elements made of bent-welded profiles.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2024; одобрена после рецензирования 21.10.2024; принята к публикации 25.10.2024.*

*The article was submitted 09.09.2024; approved after reviewing 21.10.2024; accepted for publication 25.10.2024.*