

Диагонально-сетчатые оболочки в качестве несущих систем зданий

Д.О. Семашкина¹, Т.В. Назмеева²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

² Ассоциация развития стального строительства, 119034, г. Москва, ул. Остоженка, 19с1

Информация о статье *аналитический обзор*

Аннотация

Статья посвящена одной из тенденций современного высотного строительства - диагональным сетчатым несущим конструкциям. Подобные несущие системы в последние десятилетия стали популярным решением для зданий с различным назначением, формой, высотой и пролетами, благодаря их одновременной конструктивной эффективности и архитектурной выразительности. Сетчатые оболочки способны адаптироваться и обеспечивать структурную поддержку широкому диапазону непрямолинейных геометрических форм, изогнутым и ломанным линиям. Автор статьи рассматривает историю разработок и предпосылки для применения диагональных сетчатых оболочковых систем в качестве основного несущего каркаса зданий, в том числе уникальных. Проанализированы основные проекты с применением диагонально-сетчатых оболочковых систем, а также исследования, связанные с подобными конструкциями, разобраны основные направления в строительстве высотных зданий, выявлены основные тенденции при проектировании и конструировании подобных несущих систем зданий.

Ключевые слова: несущая система, каркас, строительные конструкции, оболочка, уникальные здания, металлический каркас

Содержание

1.	Введение	41
2.	Заголовок1	41
3.	Заголовок2	51
4.	Заголовок3	52
5.	Заголовок4	54
6.	Заключение	54

Контактный автор:

1. +7(981)1532171, daria.semashkina@gmail.com (Семашкина Дарья Олеговна, студент)
2. +7(921)5451545, naztv@mail.ru (Назмеева Татьяна Вильсовна, к.т.н., рук. проектов)

1. Введение

В последние десятилетия так называемые сетчатые диагональные оболочки (diagrid structures) стали популярным архитектурным и инженерным решением для зданий с различным назначением, формой, высотой и пролетами. Сетчатые оболочки способны адаптироваться и обеспечивать структурную поддержку широкому диапазону непрямолинейных геометрических форм, изогнутым и ломанным линиям. Применение сетчатых оболочек относительно высоты в основном ограничено высотными или многоэтажными зданиями из-за характера их работы.

В таких конструкциях привычные вертикальные несущие элементы, колонны, по периметру здания заменяются наклонными элементами, образующими структурную оболочку здания с характерным ромбовидным узором. При этом внутренние колонны полностью или частично исключаются, а нагрузки от перекрытий и кровли несет балочная или ферменная система, которая передает их на оболочку. Сетчатые оболочки хорошо воспринимают как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки без традиционного структурного ядра за счет триангуляции элементов и эффективного распределения материала, что позволяет создавать уникальные здания.

Таким образом, можно выделить следующие преимущества сетчатых оболочковых систем с точки зрения архитектурных и конструктивных особенностей:

- повышенная устойчивость, благодаря треугольным элементам;
- возможность использования шарнирных соединений;
- обеспечение множества вариантов распределения нагрузки и снижение возможности разрушения;
- уменьшение собственного веса конструкций и, как следствие, нагрузки на фундамент;
- снижение материалоемкости;
- способность обеспечивать структурную поддержку множеству форм;
- создание уникальной формы здания как в плане, так и по высоте;
- архитектурная выразительность за счет элементов оболочки даже при простой форме здания;
- большая вариативность параметров сетки несущих элементов: размеров, угла наклона, формы и количества ячеек;
- большое поступление солнечного света за счет панорамного остекления;
- создание интерьеров, свободных от колонн.

С точки зрения менеджмента таких проектов существует также ряд особенностей:

- необходимость совместной работы архитекторов, инженеров и производителей, учитывая сложность проектирования, дизайна и уровень визуального влияния оболочки на конструкцию здания;
- интеграция опыта и специализации как от архитекторов, так и от инженеров;
- необходимость использования BIM – технологий;
- высокая потребность в унификации элементов и в возможности предварительной сборки.

Эффективность использования сетчатых оболочковых систем неоднократно была подтверждена реализованными проектами зданий в XXI веке. Однако всегда особое внимание стоит обращать на особенности проектируемого здания, а также на экономическую целесообразность проектирования сетчатых оболочек, так как их конструктивные особенности требуют больших затрат всевозможных ресурсов на разработку каркаса в целом и его отдельных элементов, узлов.

2. Создание и развитие сетчатых оболочковых систем с диагональными элементами

История создания и развития сетчатых оболочек в качестве каркаса высотных и уникальных зданий и сооружений началась с выдающегося российского инженера Владимира Шухова в 1896 году. [1] Эмпирические методы структурного анализа послужили основой для методов структурного проектирования, наиболее широко используемых в России в конце девятнадцатого и начале двадцатого века. Использование более сложных методов анализа для оценки напряжений в статически неопределенных системах еще не были широко распространены. Шухов разработал математические методы для создания структурных расчетов, необходимых для проектирования своих конструкций [2]. Свои методы он, предположительно, получил от синтеза геометрии Лобачевского с работой Чебышева по минимумам, максимумам и приближениям функций. Шухову также приписывают разработку графико-статического метода определения усилий в элементах, которые он проектировал [3].

Вклад российского ученого-инженера в развитие металлического строительства описывают в своих работах множество отечественных авторов, таких как Чечель М.В. и Мальцева К.О. [4], Кусочева А.Г. [5], Бойченко М.Б., Зевакина О.А., Гулых К.В. [6]. Все они отмечают прогрессивность идей и уникальность конструктивных решений Шухова для своего времени: без его разработок множество современных проектов просто не было бы реализовано. Он первым ввел в архитектуру гиперболоидные конструкции (патент Российской Империи №1896; от 12 марта 1899 года, заявленный В.Г.Шуховым 11.01.1896), которые при всей

своей сложности в форме возводились из прямолинейных элементов [7]. Сооружения на основе разработанных конструкций при всей своей эффективности и высокой несущей способности имели низкую материалоемкость [8].

Первым таким сооружением стала башня для Всероссийской промышленной и художественной выставки в Нижнем Новгороде 1896 года. Создавая конструкцию башни, Шухов сконцентрировался на вопросе эффективности работы элементов под сконцентрированной нагрузкой в верхней части сооружения, что характерно для водонапорных башен. Толчком для решения проблемы стали линейные поверхности второго порядка – гиперболические параболоиды, появившиеся в новой на тот момент неевклидовой геометрии. Такая форма позволила снизить материалозатраты и повысить несущую способность конструкции водонапорной башни. Строение благополучно сохранилось и до наших дней в селе Полибино, куда ее перенес меценат Ю.С. Нечаев-Мальцов (рис. 1а). Общая высота башни составляет 37 метров. Высота гиперболоидной оболочки башни (без учёта высот фундамента, резервуара и надстройки для обозрения) — 25,2 метра. Диаметр нижнего кольцевого основания — 10,9 метра, верхнего — 4,2 метра [9].

С 1911 года Шухов начинает экспериментировать с конструкциями, состоящими из секций гиперболоидов, соединенных между собой стальными натяжными кольцами, что стало прообразом модулей оболочковых систем. Эта концепция реализовалась в следующем значимом проекте с использованием сетчатых оболочек – радиобашне на Шаболовке в Москве (рис.1б). По первоначальным задумкам и предварительному проекту, разработанному в 1919 году, высота башни должна была составлять 350 метров при расчётной массе в 2400 тонн. Однако, из-за тяжёлой политической и экономической ситуации в стране проект был пересмотрен: итоговая высота сооружения составила 160 метров, а масса – 240 тонн [10]. На сегодняшний день обе башни Шухова включены в список объектов культурного наследия РФ.



а) Башня Шухова в селе Полибино



б) Башня Шухова на Шаболовке в Москве

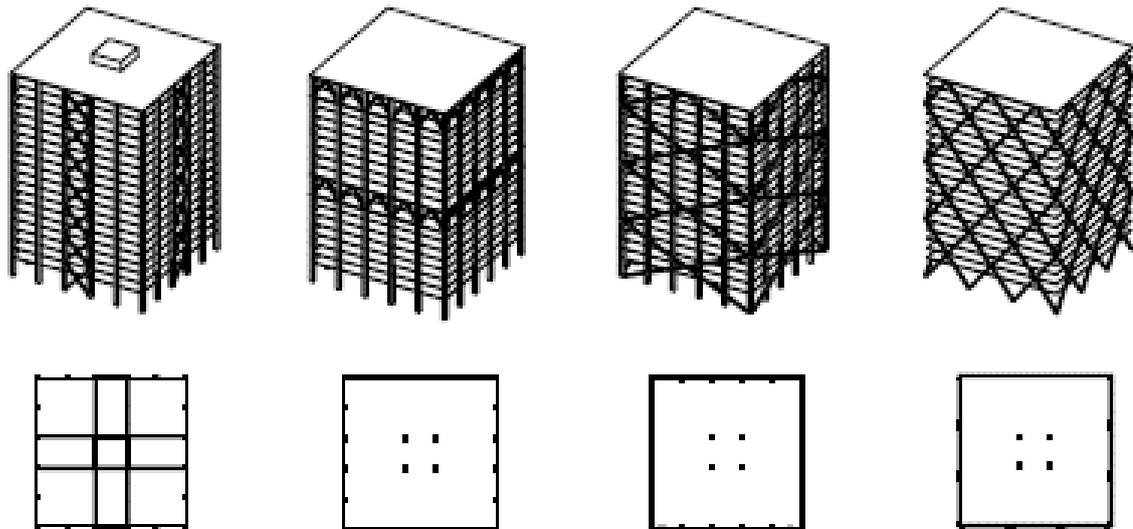
Рисунок 1 Сооружения инженера Шухова с использованием сетчатых оболочек

По проектам Шухова за всю его жизнь было построено свыше 200 башен с использованием гиперболоидных сетчатых оболочек. Несмотря на это, первые проекты с использованием сетчатых металлических оболочек в качестве основного несущего каркаса зданий стали реализовываться только спустя несколько десятилетий после смерти великого инженера.

Металлические несущие системы высотных зданий прошли долгий путь в своем развитии. В учебном пособии Копытов М.М. описывает основные вопросы проектирования металлокаркасов различной высотности: от одноэтажных до высотных [11]. Основной проблемой высотного строительства с инженерной точки зрения, как известно, являются повышенные ветровые нагрузки. Обыкновенный рамная конструкция, ставшая основой для металлических каркасов, без дополнительного усиления плохо сопротивляется подобному виду воздействий. Именно поэтому инженеры начали искать варианты более эффективного решения несущей системы здания. Одним из возможных решений проблемы стали наклонные элементы, характер работы которых позволял рассеивать ветровую нагрузку и воспринимать ее через осевые усилия, что приводило к меньшим изгибным деформациям здания в целом – так появились рамные каркасы с связевыми элементами (рис.2а).

Следующим шагом стало появление несущей системы с поясными фермами, которые играли роль своеобразных дисков жесткости, разделяя здание по высоте на модули (рис 2б).

Дополнительной задачей проектировщиков обязательно стоит эффективное распределение материала по высоте и сечению здания, и если рассматривать здание, как защемленную с одной стороны балку, то становится очевидно, что при увеличении длины такой балки и горизонтальных нагрузок на нее, наиболее важной характеристикой становится момент инерции сечения в направлениях приложения повышенных нагрузок. Исходя из таких предпосылок, можно увидеть, что оболочковые системы, удовлетворяют критерию по рациональному распределению материала по сечению, создавая высокий момент инерции всей конструкции, при этом влияние повышенных ветровых нагрузок всё также оптимально может компенсироваться наклонными элементами, меняющими характер работы конструкций на горизонтальные нагрузки с изгибного на преимущественно осевое воздействие. Реализацией этой идеи стал связевой каркас-оболочка (рис. 2в), а затем и полное удаление вертикальных несущих элементов, и появление сетчатой оболочковой системы (рис.2г).



а) Рамный каркас со связями б) Система с поясными фермами в) Оболочка со связями
г) Сетчатая оболочка

Рисунок 2 Этапы формирования сетчатого оболочкового каркаса

С одной стороны, при совершенствовании несущих каркасов для увеличения высотности зданий инженерам приходилось преодолевать множество конструктивных проблем, изменять общие подходы к проектированию.

В своих работах Сенин Н.И. [12, 13] определяет предпосылки к стремительному росту высотного строительства, обосновывает увеличение этажности городской застройки, а также выделяет основные подходы, которыми руководствуется инженер при выборе различных конструктивных схем зданий. Автор рассматривает классификацию каркасов многоэтажных зданий, различающихся по типу вертикальных несущих конструкций и, основываясь на анализе проведенных исследований и опыте проектирования, выдвигает критерии использования в определенной области тех или иных конструктивных систем. Сенин также приходит к выводу, что оболочковые системы обладают наибольшей пространственной жесткостью, что делает подобные конструкции и их модификации самыми подходящими для строительства высотных зданий [13]. Работы автора положены в основу разработанных методических указаний по проектированию многоэтажных каркасных зданий [14].

Дроздов П.Ф., Лишак В.И. в своей статье [15] рассматривают варианты обеспечения пространственной жесткости и устойчивости зданий за счет разнообразных конструктивных схем, выносят основные положения для инженеров-конструкторов при выборе основного несущего каркаса здания с точки зрения обеспечения стабильности его работы под нагрузками.

В.И. Плетнев проводит анализ развития конструктивных форм высотных зданий [16], описывает основные аспекты проектирования конструкций, такие как:

- Усложнение макроструктуры сооружения;
- Совершенствование структуры отдельных частей здания;
- Рациональный выбор материала конструкций;
- Совершенствование динамических характеристик конструкций и здания в целом.

С другой стороны, на ряду с конструктивными, инженерам приходилось также учитывать архитектурные задачи, которые становились только сложнее от проекта к проекту.

В своих многочисленных работах Магай А.А. [17-21] рассматривает развитие высотных зданий с архитектурной точки зрения. Его исследования и аналитические обзоры посвящены поиску рациональных архитектурных форм, конструктивных систем и материалов для строительства высотных зданий [17]. Автор отмечает, что высотные здания должны удовлетворять не только функциональным, но и природно-климатическим условиям, архитектурно-композиционным требованиям, современным и перспективным конструктивным и инженерным решениям [18]. Для объемно-планировочных и конструктивных решений высотных зданий характерны крупные формы элементов несущих и особенно ограждающих конструкций. Крупные элементы фасада, сильно выделяющиеся по отношению к окружающей застройке, нередко позволяют достигнуть выразительной архитектуры здания. Большая высотность зданий диктует многократную повторяемость одинаковых фрагментов, структур, плоскостей и элементов в общей композиции [19]. В своей статье [20] Магай А.А. обращает внимание на большой выбор несущих конструкций, характеризующийся большим архитектурным разнообразием, примером которых являются и современные сетчатые оболочковые системы, он также показывает, что использование усовершенствованных методов расчета конструкций, современных строительных материалов, прогрессивных технологий возведения зданий дает возможность значительно разнообразить архитектуру высотных зданий. Перспективным направлением, по мнению автора, является усложнение объемно-пространственных структур зданий, применение неортогональных форм, что благоприятно сказывается на воздействии ветровых нагрузок, минимизации соотношения площади здания к его фасадной поверхности, оптимизации расхода энергии [21].

Как можно увидеть, применение в проекте диагональных сетчатых оболочек лежит на пересечении решений как инженерно-конструкторских, так и архитектурных задач в современном мире строительства. Такая концепция рационально вписывается в существующую градостроительную обстановку, когда здания стремятся к усложнению своих форм во всех направлениях, а также к достижению всё больших и больших высот. Как описывает в своей книге Энгель Х. [22], конструкции сетчатых оболочковых систем относятся к виду «активных по высоте» и «активных по форме» несущих систем, что позволяет им становиться весьма популярным решением несущего каркаса современных высотных зданий со сложной структурой и формой.

Первым зданием, поддерживаемым оболочковой системой, стало IBM Building [23], спроектированное архитектурным бюро Curtis and Davis Architects, при поддержке инженерной компании Leslie E. Robertson Associates. По сути, сетчатая оболочковая система в данном проекте играла вспомогательную роль, частично неся нагрузки от здания и выступая одновременно ограждающей конструкцией. Высота здания была поделена на 13 модулей, соответствующих высоте одного этажа, при этом весь вес системы и воспринимаемые ей нагрузки приходят на фундамент лишь в 8 точках, образуя по краям здания значительные консоли, которые возможны благодаря снижению веса за счет использования диагональных элементов [24]. После реализации проекта IBM Building, диагональные оболочковые системы были забыты на несколько десятилетий инженерами и архитекторами в качестве решений для несущего каркаса зданий.

Новый толчок к развитию сетчатые оболочковые системы получили благодаря английскому архитектору Норману Фостеру. С начала XXI века его архитектурное бюро «Foster and Partners» стало активно использовать диагональные оболочки для своих проектов, первым из которых стало здание «London City Hall». Оболочковая система здания стала эффективным решением, способным обеспечить необходимую сложную форму здания, при этом воспринимая весь вес стеклянных ограждающих панелей.

Следующими проектами Нормана Фостера, из построенных с использованием диагонально-сетчатых несущих конструкций, стали небоскреб «Сент-Мэри Экс 30» в Лондоне и реновация здания «Херст тауэр» в Нью-Йорке. Спроектированные конструкции показали не только высокую эффективность в работе на ветровые нагрузки, что является одним из основных аспектов при проектировании высотных зданий, но и позволили значительно снизить материалоемкость и, как следствие, нагрузки на фундамент.

После разработок бюро Нормана Фостера совместно с ведущими инженерными фирмами мира оболочковые системы с диагональными элементами стали активно применяться по всему миру для строительства высотных зданий, имеющих сложную форму. Бурный всплеск строительства зданий с подобным каркасом пришелся на 2008-2012 года. В этот временной промежуток были возведены такие небоскребы как Vivaldi Tower, SIPG Tower, Tornado Tower, Guangzhou IFC, Al Dar Headquarters, Capital Gate, CCTV, Doha Tower и другие.

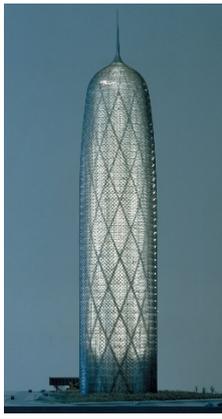
Основные примеры и характеристики проектов с использованием металлических сетчатых оболочковых систем с XIX века по настоящее время приведены в таблице 1.

Таблица 1. Проекты с применением металлических сетчатых оболочковых систем

Изображение	Наименование (расположение)	Архитектурное/конструкторское бюро	Год	Высота/кол-во этажей	Площ. м ²	Особенности модулей
	IBM Building/United Ironworkers (Питсбург, США) [24]	Curtis and Davis Architects/ Leslie E. Robertson Associates	1963	58 м/ 13 этажей		2х-этажный модуль
	London City Hall (Лондон, Англия) [25]	Foster + Partners/ Arup	2002	45 м/ 10 этажей	18000	
	PRADA Boutique (Токио, Япония) [26]	Herzog and de Meuron	2003	28 м/ 8 этажей		2х-этажный модуль, угол наклона диагоналей 33°
	Swiss Re/30 St. Mary Axe (Лондон, Англия) [27]	Foster + Partners/ Arup	2003	180 м/ 40 этажей	47950	4х-этажный модуль, угол наклона диагоналей 63°
	Hearst Magazine Tower (Нью-Йорк, США) [28]	Foster + Partners/ WS P Cantor Seinuk	2006	182 м/ 46 этажей	79500	8ми-этажный модуль, угол наклона диагоналей 70°

	Royal Ontario museum addition (Торонто, Канада) [29]	Libeskind, Bregman and Hamman/ Arup	2006	6 этажей		
	Vivaldi Tower (Амстердам, Нидерланды) [30]	Foster + Partners/ Aronsohn Raadgevende Ingenieurs BV	2008	87 м/ 24 этажа	30000	6ти-этажный модуль, угол наклона диагоналей 72°
	SIPG Tower (Шанхай, Китай) [30]	East China	2008	29 этажей		6ти-этажный модуль
	Tornado Tower (Доха, Катар) [31]	C.I.C.O/ Stroh and Ernst AG	2008	195 м/ 52 этажа	58029	4х-этажный модуль

	Guangzhou IFC (Гуанчжоу, Китай) [32,33]	Wilkinson Eyre Architects/ Arup	2010	439 м/ 103 этажа		10ти- этажный модуль
	Al Dar Headquarters (Абу-Даби, ОАЭ) [34]	MZ Architects/ Arup	2010	110 м/ 26 этажей	123000	8ми- этажный модуль, угол наклона 60°
	Capital Gate (Абу-Даби, ОАЭ) [35]	RMJM	2011	165 м/ 36 этажей	53100	2х- этажный модуль
	CCTV (Пекин, Китай) [36]	Rem Koolhaas (OMA)/ Arup	2012	234 м/ 54 этажа	473000	Отсутст- вие модулей, различ- ный угол наклона

	Doha Tower (Доха, Катар) [37]	Ateliers Jean Nouvel/ Terrell Group, China Construction Design International	2012	238 м/ 46 этажей	100000	8ми- этажный модуль, угол наклона 48°
	The Bow Tower (Калгари, Канада) [38]	Foster + Partners, Zeidler Partnership/ Yolles	2012	237 м/ 57 этажей		8ми- этажный модуль
	The Leadenhall Building (Лондон, Англия) [39]	Rogers Stirk Harbour + Partners/ Arup	2014	225 м/ 48 этажей	84424	12ти- этажный модуль
	Lotte Super Tower (Сеул, Южная Корея) [40]	S.O.M	2016	555 м/ 112 этажей	361940	Различ- ные модули по высоте, угол наклона от 60° до 79°

	Z15 Tower (Пекин, Китай) [41]	TFP Architects/ Arup	2016	528 м/ 108 этажей	300000	Различ- ные модули по высоте
	Poly International Plaza (Пекин, Китай) [42]	S.O.M	2017	162 м/ 31 этаж	116000	4х- этажный модуль
	Dorobanti Tower (Бухарест, Румыния) [30]	Zaha Hadid	Проек т	200 м/ 57 этажей	100000	Непос- тоянный угол наклона
	West Bay Office Tower (Доха, Катар) [30]	S.O.M	Проек т	230 м/ 50 этажей		Различ- ные модули по высоте, угол наклона непос- тоянный

Требования, предъявляемые к высотным зданиям, как к строениям, призванным обеспечивать людей безопасным и комфортным пространством для повседневного пребывания в условиях плотной городской застройки, а также обладающим высокими эксплуатационными и конструктивными характеристиками, выразительным архитектурным образом [43-45], всецело могут быть удовлетворены диагональными несущими оболочками.

Как видно, каждый проект с использованием таких систем в действительности является уникальным и неповторимым, таким образом для снижения затрат на проектирование и производство элементов конструкции необходимо уделять должное внимание уже существующим наработкам и реализованным решениям, анализировать полученные результаты исследований.

При всех положительных чертах оболочковые системы имеют большие проблемы в отношении конструирования элементов и узлов. В связи с тем, что узлы у диагональных систем значительно сложнее, чем у ортогональных, возрастает и цена такого типа несущих конструкций, как на этапе проектирования, так и на этапе возведения и при дальнейшей эксплуатации здания [46-48].

Однако, множество исследований, проводимых при проектировании и после возведения зданий с подобными несущими системами, сделали диагональные оболочковые системы более доступной технологией.

Ali M. с соавторами в своих статьях [49, 50] рассматривают эволюцию структурных систем высотных зданий и предполагают их возможное разделение на «внутренние» и «внешние» структуры, к которым относятся диагональные сетчатые оболочки. Авторы приходят к выводу, что в настоящее время оболочковые структуры являются одной из наиболее перспективных тенденций в высотном строительстве. Также в статье намечаются пути для будущих разработок в данной тематике.

И как можно заметить, количество проектов с диагональными оболочковыми системами в наше время неуклонно растет [51], что объясняется уходом на задний план основных их недостатков: сложность в проектировании, изготовлении и монтажа элементов конструкций, узлов и соединений. За последнее десятилетие, благодаря активному развитию и внедрению BIM-технологий, подобные конструкции получили большие ресурсы и возможности для проектирования, унификации и возведения. Сложные архитектурские задумки теперь имеют возможность реализовываться в полной мере, находя в каркасе здания не только основу, но и элементы вдохновения, а конструктивная эффективность делает подобные системы всё более популярными во времени [52-56].

Одним из основных исследователей в данной сфере является Kyoung Sun Moon. В 2009 году Moon привел методологию проектирования сетчатых оболочек, основанную на необходимой жесткости каркаса для обеспечения требуемого смещения верха здания [57]. В статье также приведены зависимости для предварительного назначения сечений несущих элементов, дан алгоритм проектирования систем в целом. Большое внимание в своих работах Moon уделяет оптимальной геометрии оболочкового каркаса [58-59], акцентируя внимание на том, что угол наклона, размеры в плане и по высоте отдельных элементов играют большую роль в материалоемкости здания в целом, а значит, и экономической эффективности всего проекта.

Moon также провел многочисленные исследования различных несущих систем [60-64], в том числе и с использованием оболочковых конструкций, сравнивая такие характеристики как степень скручивания, угол наклона, угол конусности и степень колебаний свободной формы. Было обнаружено, что в случае скрученных и сужающихся высотных зданий боковая жесткость оболочковых структур больше по сравнению с трубчатыми и аутригерными системами.

Leonard [65] провел исследование по изучению влияния сдвигового отклонения на высотное здание с системой диагональных оболочек. Здания различной конфигурации моделировались с использованием SAP 2000 и были проанализированы на сдвиговые деформации и структурные характеристики. Было замечено, что все здания с диагональными рисунками с различными конфигурациями испытывают меньшие сдвиговые отклонения из-за более высокой боковой жесткости. Было также обнаружено, что ориентация сетки элементов влияет на структурные характеристики.

Montouri и др. [66] провели систематическое и всестороннее исследование геометрических закономерностей для оболочковых систем с диагональными элементами. Оболочковые системы, характеризующиеся регулярными структурами, сравнивались с альтернативными геометрическими конфигурациями, полученными изменением угла диагоналей, а также изменением числа диагонали вдоль высоты здания.

Voake T.M. посветила свои исследования как проблемам стального строительства в целом, с конструктивной и архитектурной точек зрения [67-69], так и диагональным оболочкам в частности. В своих работах Voake приводит возможные пути решения вопросов, с которыми может столкнуться проектировщик и архитектор при разработке элементов оболочкового каркаса, рассматривает архитектурный потенциал стальных наклонных элементов и пути придания им большей выразительности [70].

Множество авторов обращают также внимание на высокие показатели эффективности работы подобных каркасов на динамические нагрузки [71-76]

Сейсмические характеристики типичных оболочковых систем были исследованы Kim и др. [77]. Для этого была спроектирована 36-этажный оболочковый каркас с различными наклонами элементов, а сейсмические характеристики оценивались с использованием нелинейных статических и динамических анализов. Анализ показал более высокую прочность и меньшую пластичность для оболочковых структур. Было также отмечено, что по мере увеличения наклона элементов сдвиг конструкций уменьшается, как и поперечные силы.

Baker W. и др. [78] предложили методологию определения коэффициентов сейсмической эффективности для стальных оболочковых систем.

Подводя итог, проанализируем основные параметры проектов, приведенных выше проектов.

Для более детального изучения временной промежуток использования оболочковых систем с диагональными элементами был поделен на 5 этапов:

- До 2000 года;
- 2000-2003 год;
- 2004-2007 год;
- 2008-2011 год;
- 2012-наши дни.

2.1. Высотность зданий с диагональными оболочковыми системами

Все рассматриваемые проекты можно разделить на 3 группы по высоте:

- Средней высотности – до 100 м;
- Высотные – от 100 до 500 м;
- Супервысокие – более 500 м.

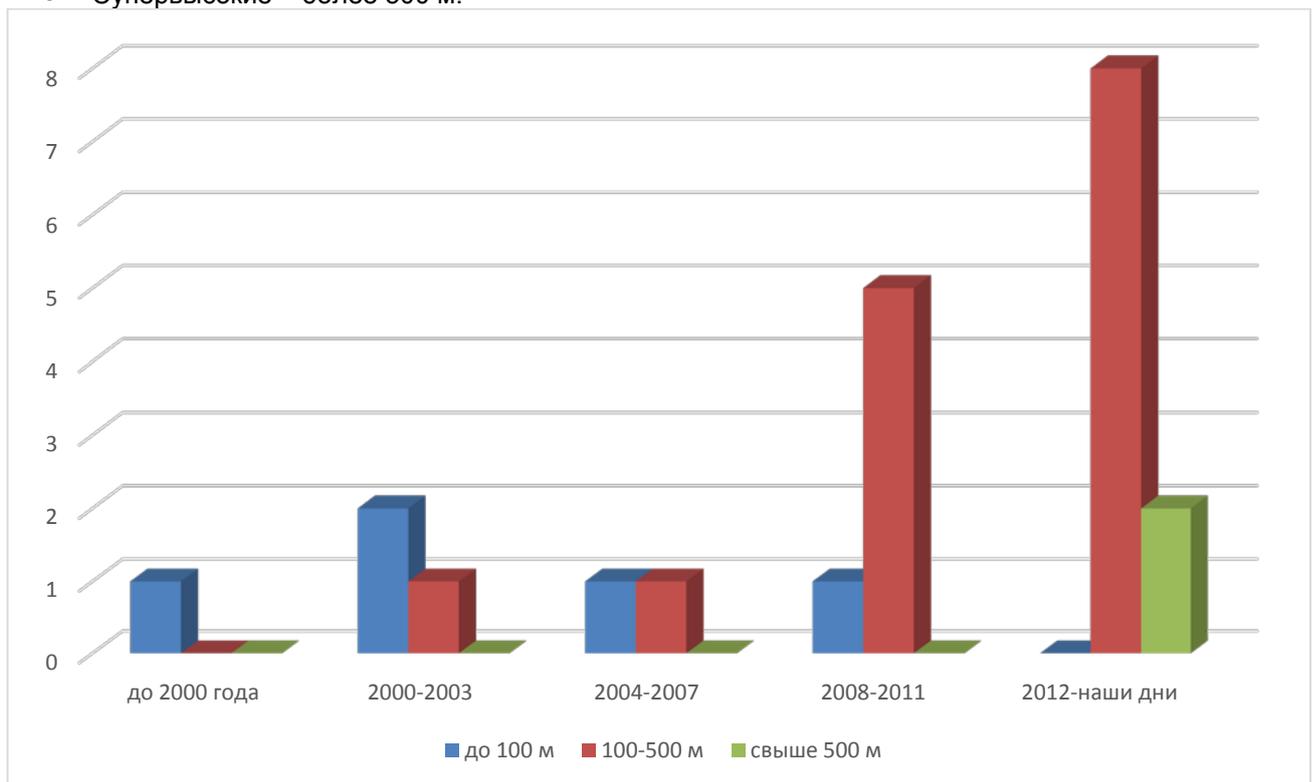


Рисунок 3 Количество проектов с использованием диагональных оболочковых систем различной высотности

Как можно видеть из графика на рис. 3, высотность зданий с использованием диагональных оболочковых систем с каждым годом становится больше и больше. Подобные системы всё чаще становятся решением для проектов высотных зданий, а в последние несколько лет даже применяются в качестве каркаса супервысоких зданий [79-81]. В основном, это связано с тем, что диагональные оболочки действительно эффективно сопротивляются горизонтальным нагрузкам, которые являются самой основной проблемой на таких высотах. Как известно, изгибающие усилия от горизонтальных нагрузок в каркасе здания имеют квадратичную зависимость от высоты здания, а нормальные усилия пропорциональны высоте, таким образом при увеличении высотности большее значение будет иметь момент инерции каркаса здания. Для оболочкового каркаса распределение материала по сечению здания в плане как раз обеспечивает высокий момент инерции, который позволяет эффективно работать на горизонтальные нагрузки. При этом, однако, следует учитывать соотношение размеров здания в плане и его высоты, по достижению определенного показателя этого соотношения, оболочковые системы перестают быть экономически эффективными.

2.2. Модули диагональных оболочковых систем

Для проектирования диагональных оболочковых систем, как правило, здание разбивается на части с повторяющейся геометрией – модули (рис. 4), которые по высоте занимают несколько этажей здания.

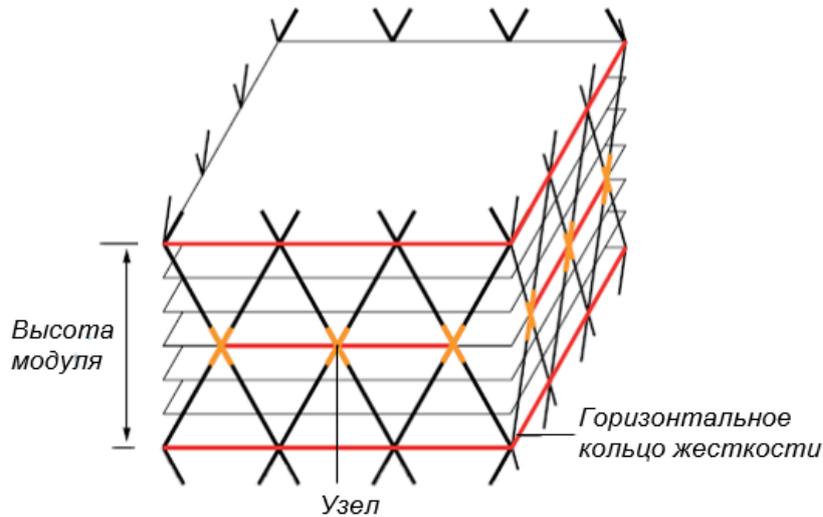


Рисунок 4 Принципиальная схема модуля диагональной оболочки

Размеры модулей можно разделить на 4 группы:

- 2-4 этажа;
- 6-8 этажей;
- Более 10 этажей;
- Непостоянные модули;

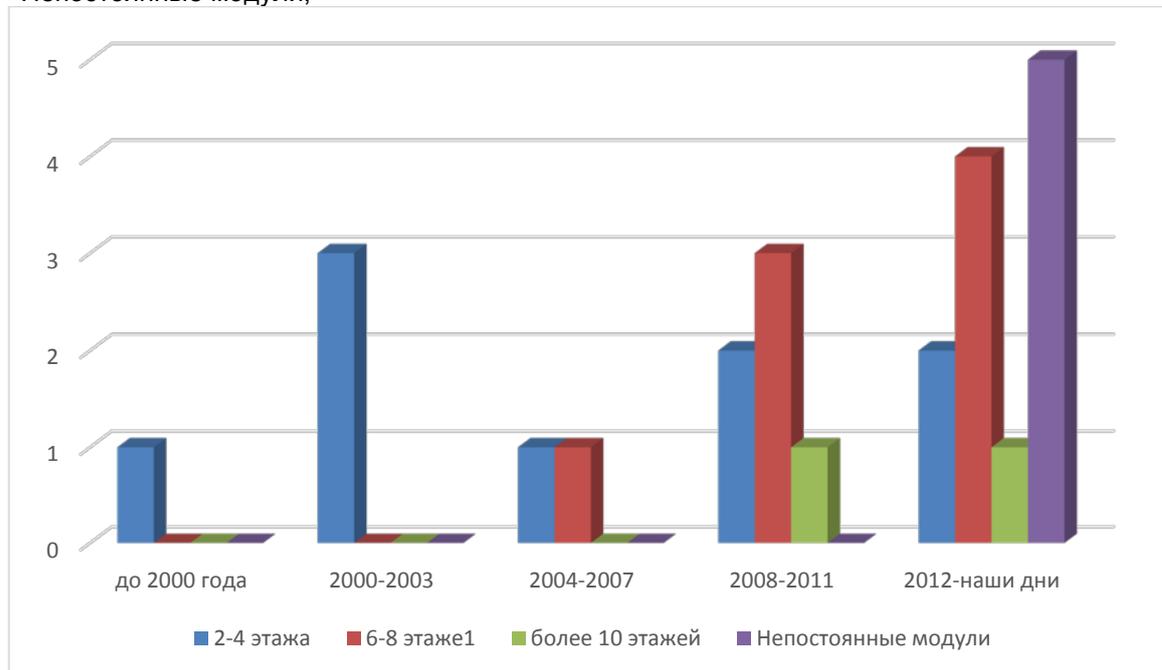


Рисунок 5. Размеры модулей диагональных оболочковых систем

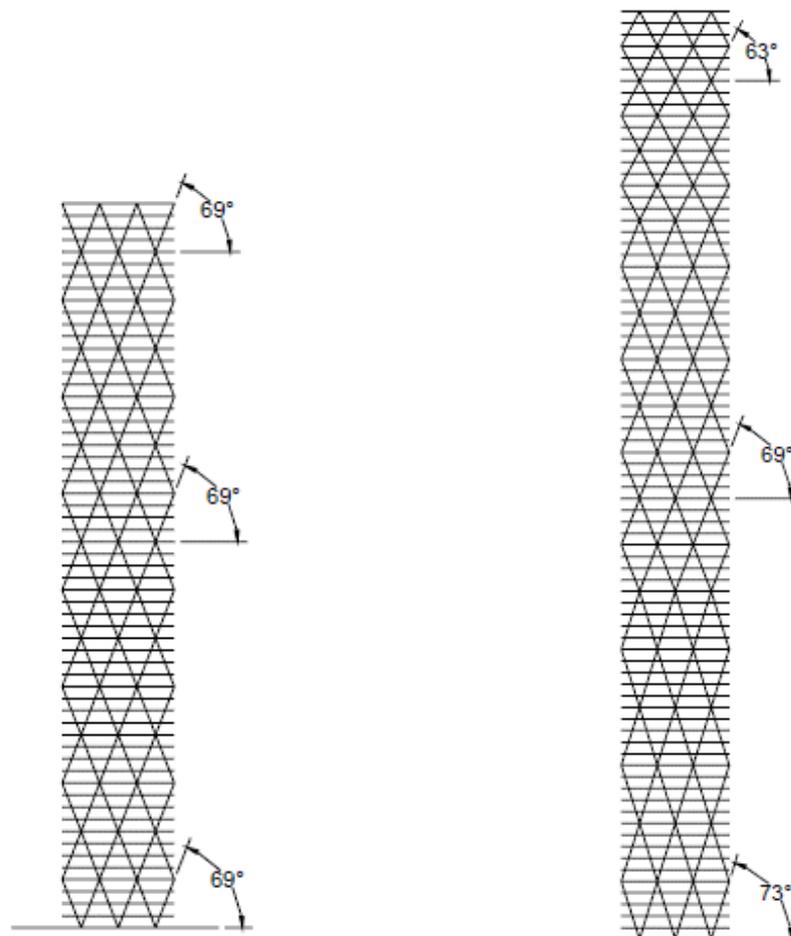
Согласно графику (рис.5), можно сделать вывод, что количество этажей, охватываемое каждым модулем, со временем только растет, а за последние годы приобретают популярность непостоянные модули, с различным углом наклона и размерами, которые могут достигать даже до 16-18 этажей [82-83]. Такой рост использования нерегулярных модулей можно объяснить их более высокой приспособляемостью к форме здания и конструктивной эффективностью из-за того, что несущая способность таких модулей и акцент на восприятие горизонтальных или вертикальных нагрузок может меняться за счет изменения угла наклона и размеров элементов. Однако, как мы можем видеть, модули среднего и малого размера не выходят из использования, что можно объяснить отсутствием экономической эффективности применения непостоянных модулей, для

зданий высотой до 500 метров и с постоянным планом этажей, так как проектирование и изготовление неунифицированных элементов и узлов несет за собой большие затраты, а также невозможностью подстроить модули большого размера под форму здания.

Еще одним важным критерием модулей оболочковых систем является угол наклона диагоналей к горизонту. От угла наклона диагоналей зависит эффективность восприятия нагрузок, так чем круче угол наклона, тем элементы лучше воспринимают вертикальные нагрузки и создают более высокую жесткость здания при изгибе. Низкие здания с маленьким соотношением «высота/ширина» ведут себя в большей степени как элементы, работающие на сдвиг, когда высокие здания с большим соотношением «высота/ширина» в основном изгибаются в процессе работы. Таким образом, по мере увеличения высоты здания будет увеличиваться и оптимальный угол наклона диагоналей [84], что мы и можем увидеть, сравнив, например, проект PRADA Boutique с высотой 28 метров и углом наклона элементов 33° с проектом Lotte Super Tower с высотой 556 метров и углом наклона от 60° до 79° . Однако, найти точное значение оптимального угла наклона является сложной инженерной задачей, поскольку на такой выбор влияет множество факторов, и наиболее удачное решение с точки зрения конструктивной эффективности может не соответствовать другим аспектам проектирования [85].

Исследователь K.S. Moon сравнил диагональные оболочковые системы [86], в которых угол наклона изменяется в горизонтальном направлении, в вертикальном или в обоих направлениях сразу. Его исследования показывают, что регулярный угол наклона по всей высоте здания является наиболее эффективным для зданий с количеством этажей от 40 до 60, в то время как непостоянный угол обеспечивает меньшую материалоемкость зданиям от 70 этажей и выше (рис.6).

Panchal, Patel, и Pandya проводили исследования для нахождения оптимального угла наклона элементов оболочкового каркаса [87]. Сравнивались результаты статического анализа 24, 36, 48 и 60 этажных структур для четырех разных углов. Сравнение проводилось с точки зрения смещения этажа, сдвиговых деформаций и материалоемкости здания. Авторами было установлено, что оптимальный угол наклона элементов находится в области от 65° до 75° .



а) Здания высотой до 60 этажей

б) Здания высотой свыше 70 этажей

Рисунок 6. Варианты оптимального угла наклона диагональных элементов

2.3. Форма зданий в плане и по высоте

Как можно видеть из изображений рассматриваемых проектов, в основном это симметричные в плане фигуры, большинство из которых представляет собой круг, эллипс или другие изогнутые формы. Даже прямоугольные и треугольные в плане здания в основном проектируются с закругленными углами [88]. Такие формы присущи больше высотным зданиям, так как ветровые нагрузки здесь начинают играть основную роль при проектировании конструкций, и, как показывают исследования [89], некоторые изменения здания в сторону более сглаженной формы могут значительно снизить влияние ветровой энергии, возникающие моменты, а также образование завихрений (рис. 7).

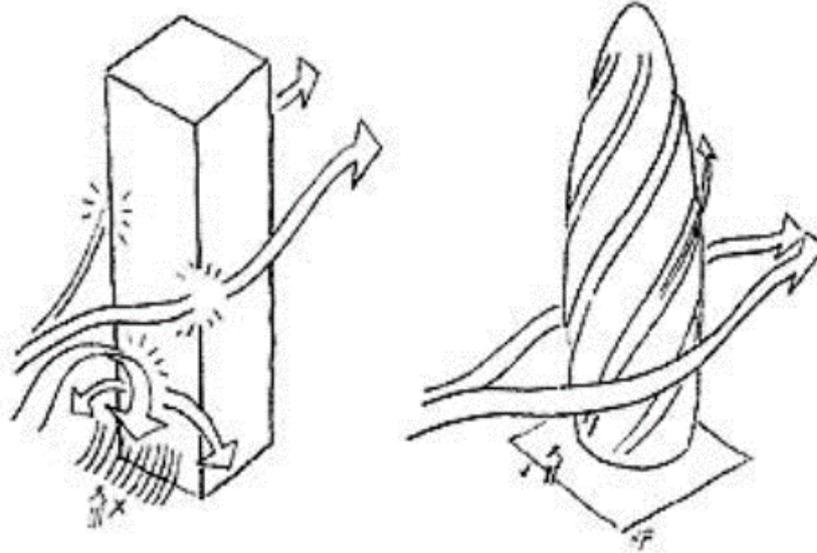


Рисунок 7. Влияние формы здания на обтекание ветром

Конструкции диагональных систем, благодаря своей способности создавать «сетку», как видно, могут с легкостью обеспечивать подобную форму здания как в плане, так и по высоте здания [90]. При этом, по свойствам гиперболических оболочек, стержни, создающие подобную изогнутую форму, сами остаются прямолинейными и продолжают работать в основном на осевые воздействия, что хорошо сказывается на несущей способности элементов.

Множество зарубежных исследователей рассматривают воздействие ветровых нагрузок на диагональные оболочковые системы и отмечают их высокую эффективность [91-94]. Meza EG, Diaz JA приходят к выводу [95], что оболочковая структура с круговым планом показывает более высокую прочность, чем структура с квадратным планом в результате уменьшения явления сдвиговых деформаций.

3. Заключение

Оболочковые системы, благодаря бурному развитию технологий информационного моделирования и методов проектирования в XXI веке, получили большой толчок для их активного применения. Такие несущие конструкции имеют большой интерес как для инженеров-конструкторов, так и для архитекторов, так как совмещают в себе множество положительных характеристик как для каркаса здания, так и для архитектурной выразительности проекта.

Эффективность сетчатых оболочковых систем неоднократно была подтверждена на практике при строительстве уникальных зданий. Однако, при выборе данных систем в качестве основного несущего каркаса здания необходимо учитывать множество факторов таких, как например:

- высотность здания;
- форму в плане и по высоте;
- геометрические особенности;
- угол наклона элементов оболочки;
- эффективное деление на модули;
- преимущественные нагрузки на систему.

Особое внимание стоит обращать на экономическую целесообразность проектирования сетчатых оболочек, так как их конструктивные особенности требуют больших затрат всевозможных ресурсов как на разработку каркаса в целом, так и на его отдельные элементы, узлы.

Литература

- [1]. Шухова Е. М. Труды и дни инженера В. Г. Шухова // Наше наследие. 2004. № 70. С. 82–98.
- [2]. Grefe R., Perchi O., Shukhov F. V., Gappoyev M.M. "Shukhov (1853-1939). Art of design". M., 1994. 192 p.
- [3]. English, Elizabeth C. Origins of Soviet Avant-Garde Rationalist Architecture in the Russian Mystical-Philosophical and Mathematical Intellectual Tradition. University of Pennsylvania, 2000. 264 p.
- [4]. Чечель М.В., Мальцева К.О. Уникальность конструкций Шухова // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. 2016. С. 201-204
- [5]. Кусочева А.Г. Применение гиперболических конструкций в строительстве и архитектуре. // Информация и образование: границы коммуникаций. 2011. №3(11). С. 323-327.
- [6]. Бойченко М.Б., Зевакина О.А., Гулых К.В. Гиперболические конструкции // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. №7-2. С. 153-155.
- [7]. Ахметзянов Р.И., Данченко Л.В., Рыбалкина Р.И. Геометрические и конструктивные особенности гиперболических конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4. С. 59-64.
- [8]. Якуба О.В., Бардин А.В. Диагонально-сетчатые несущие конструкции в высотных зданиях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. 7 (22). С.82-91
- [9]. Ивахнюк В. А. Рациональное проектирование несущих конструкций (идеи В. Г. Шухова и их последующее развитие) // Сооружения, конструкции, технологии и строительные материалы XXI века: сб. докл. II междунар. науч.-практ. семинара молодых ученых, аспирантов и докторантов. В 3 ч. №1. 1999. С. 54–58.
- [10]. Юрин А. В. Металлическая башня В. Г. Шухова на Шаболовке // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2006. № 4. С. 82–83.
- [11]. Копытов М.М. Металлические конструкции каркасных зданий: учебное пособие. М: Издательство АСВ, 2016. 400 с.
- [12]. Сенин Н.И. Рациональное применение конструктивных систем многоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 76-83.
- [13]. Сенин Н.И. Многокритериальный выбор рациональных конструктивных систем многоэтажных зданий // Бетон и железобетон - взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. С. 350-357.
- [14]. Горбатов С.В., Кабанцев О.В., Плотников А.И., Родина А.Ю., Сенин Н.И., Филимонова Е.А., Домарова Е.В. Проектирование несущих конструкций многоэтажного каркасного здания: методические указания. М: Издательство МГСУ. 2015. 103 с.
- [15]. Дроздов П.Ф., Лшак В.И. Пространственная жесткость и устойчивость многоэтажных зданий различных конструктивных систем // Труды III Междунар. симпозиума S-41 МСС и Объединенного комитета по высотным зданиям. Публикация № 43. М:ЦНИИЭП жилища, 1976. С. 20-25.

References

- [1]. Shukhova Ye. M. Trudy i dni inzhenera V. G. Shukhova // Nashe nasledie. 2004. № 70. S. 82–98.
- [2]. Grefe R., Perchi O., Shukhov F. V., Gappoyev M.M. "Shukhov (1853-1939). Art of design". M., 1994. 192 p.
- [3]. English, Elizabeth C. Origins of Soviet Avant-Garde Rationalist Architecture in the Russian Mystical-Philosophical and Mathematical Intellectual Tradition. University of Pennsylvania, 2000. 264 p.
- [4]. Chechel M.V., Maltseva K.O. Unikalnost konstruktсий Shukhova // Kulaginskiye chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov. 2016. S. 201-204
- [5]. Kuscocheva A.G. Primeneniye giperbolicheskikh konstruktсий v stroitelstve i arkhitekture. // Informatsiya i obrazovaniye: granitsy kommunikatsiy. 2011. №3(11). S. 323-327.
- [6]. Boychenko M.B., Zevakina O.A., Gulykh K.V. Giperbolidnyye konstruktсии // Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk. 2016. №7-2. S. 153-155.
- [7]. Akhmetzyanov R.I., Danchenko L.V., Rybalkina R.I. Geometricheskiye i konstruktivnyye osobennosti giperboloidnykh konstruktсий // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2014. № 4. S. 59-64.
- [8]. Yakuba O.V., Bardin A.V. Diagonalno-setchatyye nesushchiye konstruktсии v vysoznykh zdaniyakh // Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2014. 7 (22). S.82-91
- [9]. Ivakhnyuk V. A. Ratsionalnoye proyektirovaniye nesushchikh konstruktсий (idei V. G. Shukhova i ikh posleduyushcheye razvitiye) // Sooruzheniya, konstruktсии, tekhnologii i stroitelnyye materialy XXI veka: sb. dokl. II mezhdunar. nauch.-prakt. seminar molodykh uchenykh, aspirantov i doktorantov. V 3 ch. №1. 1999. S. 54–58.
- [10]. Yurin A. V. Metallicheskaya bashnya V. G. Shukhova na Shabolovke // Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka. 2006. № 4. S. 82–83.
- [11]. Kopytov M.M. Metallicheskiye konstruktсии karkasnykh zdaniy: uchebnoye posobiye. M: Izdatelstvo ASV, 2016. 400 s.
- [12]. Senin N.I. Ratsionalnoye primeneniye konstruktivnykh sistem mnogoetazhnykh zdaniy // Vestnik MGSU. 2013. № 11. S. 76-83.
- [13]. Senin N.I. Mnogokriterialnyy vybor ratsionalnykh konstruktivnykh sistem mnogoetazhnykh zdaniy // Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushcheye: nauchnyye trudy III Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu: v 7 tomakh. 2014. S. 350-357.
- [14]. Gorbatov S.V., Kabantsev O.V., Plotnikov A.I., Rodina A.Yu., Senin N.I., Filimonova Ye.A., Domarova Ye.V. Proyektirovaniye nesushchikh konstruktсий mnogoetazhnogo karkasnogo zdaniya: metodicheskiye ukazaniya. M: Izdatelstvo MGSU. 2015. 103 s.
- [15]. Drozdov P.F., Lshak V.I. Prostranstvennaya zhestkost i ustoychivost mnogoetazhnykh zdaniy razlichnykh konstruktivnykh sistem // Trudy III Mezhdunar. simpoziuma S-41 MSS i Ob'yedinennogo komiteta po vysoznykh zdaniyam.

- [16]. Плетнев В.И., Самсонов А.В. Анализ и развитие конструктивных форм высотных зданий // Вестник гражданских инженеров. 2004. № 1. С. 64-70.
- [17]. Магай А.А., Дубынин Н.В. Особенности архитектурной типологии высотных зданий. // Архитектура и строительство России. 2009. № 4. С. 22-29.
- [18]. Магай А.А. Моделирование функциональных структур высотных зданий. // Жилищное строительство. 2016. № 12. С. 17-21.
- [19]. Магай А.А. Архитектурно-композиционные особенности высотных зданий. // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 4. С. 25-30.
- [20]. Магай А.А. Материалы и конструкции высотных зданий. // Строительные материалы. 2008. № 4. С. 106-107.
- [21]. Магай А.А. Архитектура высотных зданий с неортогональными формами. // Жилищное строительство. 2009. № 6. С. 21-23
- [22]. Энгель Х. Несущие системы. пер. с нем. Л.А. Андреевой. М: АСТ:Астрель. 2007. 344 с.
- [23]. Boake T. M. Diagrid Structures: systems, connections, details. Birkhäuser, 2014. 184 p.
- [24]. Nordenson G., ed. by Leslie E. Robertson. "A Life in Structural Engineering." Seven Structural Engineers: The Felix Candela Lectures. Museum of Modern Art, 2008. 187 p.
- [25]. Barker D. Foster's New City Hall. ArchitectureWeek. London. 2003.
- [26]. Nakai, M., Tanno Y., Kozuka H. and Ohata, M. "PRADA Boutique Aoyama", Japan. Journal of International Association for Bridge and Structural Engineering, Structural Engineering International Vol. 15, No. 1, 2005, pp. 28-31
- [27]. Munro D. Swiss Re's Building London. Stelbyggnad, 2004. no. 3. pp. 36-43
- [28]. Rahimian A. Something Old, Something New. Modern Steel Construction, April 2007. pp. 48-53
- [29]. Lam F., Lewis D., Sutherland J. The Royal Ontario Museum, Toronto. The ARUP Journal. 3. 2008. pp. 22-33
- [30]. Korsavi S., Maqhareh M.R. The Evolutionary Process of Diagrid Structure Towards Architectural, Structural and Sustainability Concepts: Reviewing Case Studies. J Archit Eng Tech 3: 121. 2014. pp 1-11
- [31]. Wood A. Best Tall Buildings 2009: CTBUH International Award Winning Projects. Routledge. 2010. 167 p.
- [32]. Wood A. Best Tall Buildings 2011: CTBUH International Award Winning Projects. Routledge. 2012. 211 p.
- [33]. Wilkinson C. Guangzhou Finance Center: An Elegant Simplicity of Form. CTBUH 9th World Congres. 2012. pp. 386-390
- [34]. Miller J. P., Douglas A. Strong Diagonals. Civil Engineering 76. 2006. no. 11. pp.60-61
- [35]. Schofield J. Capital Gate, Abu Dhabi. CTBUH Journal. 2012. issue II. pp. 12-17
- [36]. Carroll C. Case Study: CCTV Building – Headquarters & Cultural Center. CTBUH Journal. 2008. issue III. pp.14-24
- [37]. Wood A. Best Tall Buildings 2012: CTBUH International Award Winning Projects. Routledge, 2012. 223 p.
- Publikatsiya № 43. M:TsNIIEP zhilishcha, 1976. S. 20-25.
- [16]. Pletnev V.I., Samsonov A.V. Analiz i razvitiye konstruktivnykh form vysotnykh zdaniy // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2004. № 1. S. 64-70.
- [17]. Magay A.A., Dubynin N.V. Osobennosti arkhitekturnoy tipologii vysotnykh zdaniy. // Arkhitektura i stroitelstvo Rossii. 2009. № 4. S. 22-29.
- [18]. Magay A.A. Modelirovaniye funktsionalnykh struktur vysotnykh zdaniy. // Zhilishchnoye stroitelstvo. 2016. № 12. S. 17-21.
- [19]. Magay A.A. Arkhitekturno-kompozitsionnyye osobennosti vysotnykh zdaniy. // Akademicheskii vestnik UralNIIProyekt RAASN. 2015. № 4. S. 25-30.
- [20]. Magay A.A. Materialy i konstruksii vysotnykh zdaniy. // Stroitelnyye materialy. 2008. № 4. S. 106-107.
- [21]. Magay A.A. Arkhitektura vysotnykh zdaniy s neortogonalnymi formami. // Zhilishchnoye stroitelstvo. 2009. № 6. S. 21-23
- [22]. Engel Kh. Nesushchiye sistemy. per. s nem. L.A. Andreyevoy. M: AST:Astrel. 2007. 344 s.
- [23]. Boake T. M. Diagrid Structures: systems, connections, details. Birkhäuser, 2014. 184 p.
- [24]. Nordenson G., ed. by Leslie E. Robertson. "A Life in Structural Engineering." Seven Structural Engineers: The Felix Candela Lectures. Museum of Modern Art, 2008. 187 p.
- [25]. Barker D. Foster's New City Hall. ArchitectureWeek. London. 2003.
- [26]. Nakai, M., Tanno Y., Kozuka H. and Ohata, M. "PRADA Boutique Aoyama", Japan. Journal of International Association for Bridge and Structural Engineering, Structural Engineering International Vol. 15, No. 1, 2005, pp. 28-31
- [27]. Munro D. Swiss Re's Building London. Stelbyggnad, 2004. no. 3. pp. 36-43
- [28]. Rahimian A. Something Old, Something New. Modern Steel Construction, April 2007. pp. 48-53
- [29]. Lam F., Lewis D., Sutherland J. The Royal Ontario Museum, Toronto. The ARUP Journal. 3. 2008. pp. 22-33
- [30]. Korsavi S., Maqhareh M.R. The Evolutionary Process of Diagrid Structure Towards Architectural, Structural and Sustainability Concepts: Reviewing Case Studies. J Archit Eng Tech 3: 121. 2014. pp 1-11
- [31]. Wood A. Best Tall Buildings 2009: CTBUH International Award Winning Projects. Routledge. 2010. 167 p.
- [32]. Wood A. Best Tall Buildings 2011: CTBUH International Award Winning Projects. Routledge. 2012. 211 p.
- [33]. Wilkinson C. Guangzhou Finance Center: An Elegant Simplicity of Form. CTBUH 9th World Congres. 2012. pp. 386-390
- [34]. Miller J. P., Douglas A. Strong Diagonals. Civil Engineering 76. 2006. no. 11. pp.60-61
- [35]. Schofield J. Capital Gate, Abu Dhabi. CTBUH Journal. 2012. issue II. pp. 12-17
- [36]. Carroll C. Case Study: CCTV Building – Headquarters & Cultural Center. CTBUH Journal. 2008. issue III. pp.14-24
- [37]. Wood A. Best Tall Buildings 2012: CTBUH International Award Winning Projects. Routledge, 2012. 223 p.

- [38]. Charnish B., McDonnell T. "The Bow": Unique Diagrid Structural System for a Sustainable Tall Building. CTBUH 8th World Congress. 2008. pp.2-5
- [39]. Young A., Annereau N., Butler A., Smith B. The Leadenhall Building, London. CTBUH Journal, issue II, 2013. pp. 12-17
- [40]. Besjak C., Bonghwan Kim, Preetam Biswas. 555m Tall Lotte Super Tower, Seoul, Korea. Structures. ASCE. 2009. pp.1452-1461
- [41]. Krummick S., Urban Models for the 21st Century. CTBUH 9th World Congress. 2012. pp. 577-584
- [42]. Sarkisian M., Mathias N., Garai R. POLY International Plaza, Beijing. STRUCTURE magazine. Nov. 2017. pp.34-36
- [43]. Диденко В. Г. Высотное строительство: проблемы и перспективы // Социология города. 2008. № 1. pp.73-78
- [44]. Потапова Ю. И. Высотное строительство в России – проблемы, задачи и способы их решения // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 14-16
- [45]. Park S.M., Elnimeiri M., Sharpe D.C., Krawczyk R.J. Tall building form generation by parametric design process. CTBUH, Seoul Conference. 2004. 7 p.
- [46]. In Yong Jung, Young Ju Kim, Young K. Ju, Sang Dae Kim, Sung Jig Kim. Experimental investigation of web-continuous diagrid nodes under cyclic load. Engineering Structures. 2014. 69. pp. 90–101
- [47]. Young-Ju Kim, Myeong-Han Kim, In-Yong Jung, Young K. Ju, Sang-Dae Kim. Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures. Engineering Structures. 2011. 33. pp. 2134–2144
- [48]. Lee S., Kim J., Choi S. Strength evaluation for cap plate on the node connection in circular steel tube diagrid system. International Journal of High-Rise Buildings. 2012. Vol.1. №1. pp. 21-28
- [49]. Xiaolei Han, Chao Huang, Jing Ji, Jianying Wu (2008). Experimental and Numerical Investigation of the Axial Behavior of Connection in CFST Diagrid Structures. Tsinghua Science & Technology. 2008. Vol. 13/1. pp. 108-113
- [50]. Ali M.M, Armstrong P. The Role of Systems Integration in the Design of Sustainable Skyscrapers. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. 2008. 1. pp. 95-106
- [51]. Ali M.M, Al-Kodmany K. An overview of structural and aesthetic developments in tall buildings using exterior bracing and diagrid systems. International Journal of High-Rise Buildings. 2016. Vol.6. №4. pp. 271-291
- [52]. Ali M.M, Moon K.S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. Architectural Science Review. 2007. 50. pp. 205-223.
- [53]. Toreno M., Arpino R., Mele E., Brandonisio G., De Luca A. An Overview on Diagrid Structures for Tall Buildings. International Journal of Structural Engineers World Congress. 2012. Vol. 2 No. 1. pp.22-28.
- [54]. Binh K. Nguyen, Altan H. Strategies to Reduce Lateral Forces on High-rise Buildings that Use Diagrid Structural System. School of Architecture The University of Sheffield. Sheffield. UK. 2008. 4 p
- [55]. Panchal N.B., Patel V. R. Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. pp. 374-378
- [38]. Charnish B., McDonnell T. "The Bow": Unique Diagrid Structural System for a Sustainable Tall Building. CTBUH 8th World Congress. 2008. pp.2-5
- [39]. Young A., Annereau N., Butler A., Smith B. The Leadenhall Building, London. CTBUH Journal, issue II, 2013. pp. 12-17
- [40]. Besjak C., Bonghwan Kim, Preetam Biswas. 555m Tall Lotte Super Tower, Seoul, Korea. Structures. ASCE. 2009. pp.1452-1461
- [41]. Krummick S., Urban Models for the 21st Century. CTBUH 9th World Congress. 2012. pp. 577-584
- [42]. Sarkisian M., Mathias N., Garai R. POLY International Plaza, Beijing. STRUCTURE magazine. Nov. 2017. pp.34-36
- [43]. Didenko V. G. Vysotnoye stroitelstvo: problemy i perspektivy // Sotsiologiya goroda. 2008. № 1. pp.73-78
- [44]. Potapova Yu. I. Vysotnoye stroitelstvo v Rossii – problemy, zadachi i sposoby ikh resheniya // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2012. № 6. S. 14-16
- [45]. Park S.M., Elnimeiri M., Sharpe D.C., Krawczyk R.J. Tall building form generation by parametric design process. CTBUH, Seoul Conference. 2004. 7 p.
- [46]. In Yong Jung, Young Ju Kim, Young K. Ju, Sang Dae Kim, Sung Jig Kim. Experimental investigation of web-continuous diagrid nodes under cyclic load. Engineering Structures. 2014. 69. pp. 90–101
- [47]. Young-Ju Kim, Myeong-Han Kim, In-Yong Jung, Young K. Ju, Sang-Dae Kim. Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures. Engineering Structures. 2011. 33. pp. 2134–2144
- [48]. Lee S., Kim J., Choi S. Strength evaluation for cap plate on the node connection in circular steel tube diagrid system. International Journal of High-Rise Buildings. 2012. Vol.1. №1. pp. 21-28
- [49]. Xiaolei Han, Chao Huang, Jing Ji, Jianying Wu (2008). Experimental and Numerical Investigation of the Axial Behavior of Connection in CFST Diagrid Structures. Tsinghua Science & Technology. 2008. Vol. 13/1. pp. 108-113
- [50]. Ali M.M, Armstrong P. The Role of Systems Integration in the Design of Sustainable Skyscrapers. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. 2008. 1. pp. 95-106
- [51]. Ali M.M, Al-Kodmany K. An overview of structural and aesthetic developments in tall buildings using exterior bracing and diagrid systems. International Journal of High-Rise Buildings. 2016. Vol.6. №4. pp. 271-291
- [52]. Ali M.M, Moon K.S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. Architectural Science Review. 2007. 50. pp. 205-223.
- [53]. Toreno M., Arpino R., Mele E., Brandonisio G., De Luca A. An Overview on Diagrid Structures for Tall Buildings. International Journal of Structural Engineers World Congress. 2012. Vol. 2 No. 1. pp.22-28.
- [54]. Binh K. Nguyen, Altan H. Strategies to Reduce Lateral Forces on High-rise Buildings that Use Diagrid Structural System. School of Architecture The University of Sheffield. Sheffield. UK. 2008. 4 p
- [55]. Panchal N.B., Patel V. R. Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. pp. 374-378

- [56]. Mashhadiali N, Kheyroddin. Proposing the hexagrid system as a new structural system for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2013. 22. pp.1310-1329
- [57]. Moon K. Design and Construction of Steel Diagrid Structures. School of Architecture. Yale University. New Haven. USA. 2009. pp. 398-405
- [58]. Moon K.S., Connor, J. J. & Fernandez, J. E. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2009. Vol. 16.2. pp. 205-230
- [59]. Moon K.S. Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. *Procedia Engineering*. 2011.14. pp 1343-1350
- [60]. Moon K.S. Structural Design and Construction of Complex-Shaped tall buildings. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 7. No.1. pp. 30-35.
- [61]. Moon K.S. Dynamic interrelationship between technology and architecture in tall buildings. Massachusetts Institute of Technology. 2005. pp. 225-229
- [62]. Moon K.S. Sustainable Design of Braced Tube Structures: The Role of Geometric Configuration. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2011. 2 pp. 229-236.
- [63]. Moon K.S. Sustainable Design of Diagrid Structural Systems for Tall Buildings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2011. 2 pp. 37-42.
- [64]. Moon K.S. Sustainable Selection of Structural Systems for Tall Buildings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2010. Vol. 1. pp. 47-52
- [65]. Leonard J. Investigation of shear lag effect in high-rise buildings with diagrid system. Massachusetts Institute of Technology. USA. 2007.62p.
- [66]. Montuori G., Mele E., Brandonisio G., De Luca A. Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 71. pp. 112-127
- [67]. Boake T. Understanding Steel Design: An Architectural Design Manual. Canada. 2011. 18 p.
- [68]. Boake T. CISC Guide for Specifying Architecturally Exposed Structural Steel. Canada. 2012. 26 p.
- [69]. Boake T. Architecturally Exposed Structural Steel: Specifications, Connections, Details. Walter de Gruyter, Inc. 2015. 184 p.
- [70]. Boake T. Diagrids, the new stability system: combining architecture with engineering. Canada. 2013. 10 p.
- [71]. Lago A, Sullivan T.J., Calvi G.M. A novel seismic design strategy for structures with complex geometry. *Journal of Earthquake Engineering*. 2014. 14. pp.69-105.
- [72]. Nasim S. Mogaddasi B., Zhang Y. Seismic analysis of diagrid structural frames with shear link fuse device, *Earthquake Engineering & Engineering Vibrations*. 2013. 12. pp. 463-472.
- [73]. Nakai M. Unique Architectural Forms Enabled by Base-Isolation. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. 2008. 8 p.
- [74]. Meijer de J.H.M. Lateral Stiffness of Hexagrid Structures. Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment. 2012. 81 p.
- [55]. Panchal N.B., Patel V. R. Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. pp. 374-378
- [56]. Mashhadiali N, Kheyroddin. Proposing the hexagrid system as a new structural system for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2013. 22. pp.1310-1329
- [57]. Moon K. Design and Construction of Steel Diagrid Structures. School of Architecture. Yale University. New Haven. USA. 2009. pp. 398-405
- [58]. Moon K.S., Connor, J. J. & Fernandez, J. E. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2009. Vol. 16.2. pp. 205-230
- [59]. Moon K.S. Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. *Procedia Engineering*. 2011.14. pp 1343-1350
- [60]. Moon K.S. Structural Design and Construction of Complex-Shaped tall buildings. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 7. No.1. pp. 30-35.
- [61]. Moon K.S. Dynamic interrelationship between technology and architecture in tall buildings. Massachusetts Institute of Technology. 2005. pp. 225-229
- [62]. Moon K.S. Sustainable Design of Braced Tube Structures: The Role of Geometric Configuration. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2011. 2 pp. 229-236.
- [63]. Moon K.S. Sustainable Design of Diagrid Structural Systems for Tall Buildings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2011. 2 pp. 37-42.
- [64]. Moon K.S. Sustainable Selection of Structural Systems for Tall Buildings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2010. Vol. 1. pp. 47-52
- [65]. Leonard J. Investigation of shear lag effect in high-rise buildings with diagrid system. Massachusetts Institute of Technology. USA. 2007.62p.
- [66]. Montuori G., Mele E., Brandonisio G., De Luca A. Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 71. pp. 112-127
- [67]. Boake T. Understanding Steel Design: An Architectural Design Manual. Canada. 2011. 18 p.
- [68]. Boake T. CISC Guide for Specifying Architecturally Exposed Structural Steel. Canada. 2012. 26 p.
- [69]. Boake T. Architecturally Exposed Structural Steel: Specifications, Connections, Details. Walter de Gruyter, Inc. 2015. 184 p.
- [70]. Boake T. Diagrids, the new stability system: combining architecture with engineering. Canada. 2013. 10 p.
- [71]. Lago A, Sullivan T.J., Calvi G.M. A novel seismic design strategy for structures with complex geometry. *Journal of Earthquake Engineering*. 2014. 14. pp.69-105.
- [72]. Nasim S. Mogaddasi B., Zhang Y. Seismic analysis of diagrid structural frames with shear link fuse device, *Earthquake Engineering & Engineering Vibrations*. 2013. 12. pp. 463-472.

- [75]. Stephen P.S., Kramer D.R., Sarkkinen D.L. The Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column Frames. 13th World Conference on Earthquake Engineering. 2004. 12 p.
- [76]. Mele E, Toreno M, Brandonisio G, De Luca A. Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. The Structural Design of Tall and Special Buildings 2014. 23. pp. 124-145
- [77]. Kim J., Jun Y., Ho Lee Y. Seismic Performance Evaluation of Diagrid System Buildings. 2nd Specialty Conference on Disaster Mitigation. 2010. pp. 1932-1936
- [78]. Baker W., Besjak C., Sarkisian M., Lee P., Doo C.S. Proposed Methodology to Determine Seismic Performance Factors for Steel Diagrid Framed Systems. CTBUH 13th U.S. Japan Workshop. 2010. 14 p.
- [79]. Fu X, Wu B, Chen XC, Meng ML, Sun C. Research on structural design of a super high-rise building in Qatar. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering 2008.1. pp. 186-197
- [80]. Taghizadeh K, Seyedinnoor S. Super-Tall Buildings Forms Based on Structural Concepts and Energy Conservation Principles. Architecture Research 2013. 3. pp.13-19
- [81]. Winter U.M, Terwel I.K, Van Eerden I.S, Everts I.H. Super High Rise in Rotterdam. Structural Engineering. 2011. Vol. 1. pp. 186-197
- [82]. Carroll C., Gibbons C., Ho G., Kwok M., Lee A. CCTV Headquarters, Beijing, China: Building the structure. The Arup Journal. 2008. pp. 40-50
- [83]. Carroll C., Duan X., Gibbons C., Lawson R., Lee A. China Central Television Headquarters-Structural Design. Steel Structures 2006. 6. pp. 387-391.
- [84]. Stromberg L.L, Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. 43. pp. 165-180
- [85]. Park K., Holt N. Parametric Design Process of a Complex Building In Practice Using Programmed Code As Master Model. International Journal of Architectural Computing. 2010. 8. pp. 359-376
- [86]. Moon K.S. Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. Architectural Science Review 2008. 51. pp. 239-251
- [87]. Panchal N.B., Patel V.R., Pandya I.I., Optimum Angle of Diagrid Structural System, International Journal of Engineering and Technical Research. 2014. Vol. 2. No. 6. pp. 150-157.
- [88]. Sundberg J.N. A computational approach to the design of free form diagrid structure. Massachusetts Institute of Technology. USA. 2009. 82 p.
- [89]. David S., Farnsworth D., Jackson M., Clark M. The Effects of Complex Geometry on Tall Towers. Wiley Interscience. 2007. 2. pp. 441-455
- [90]. Mousavi F. 30 St. Mary Axe. Harvard Design Magazine 2012. 35. pp. 54-59
- [91]. Fu J.Y., Wu J.R., Xu A., Li Q.S., Xiao Y.Q. Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower. Engineering Structures. 2012. 35. pp. 120-139
- [92]. Lee D., Shin S. Advanced high strength steel tube diagrid using TRIZ and nonlinear pushover analysis. Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 96. pp. 151-158
- [73]. Nakai M. Unique Architectural Forms Enabled by Base-Isolation. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. 2008. 8 p.
- [74]. Meijer de J.H.M. Lateral Stiffness of Hexagrid Structures. Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment. 2012. 81 p.
- [75]. Stephen P.S., Kramer D.R., Sarkkinen D.L. The Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column Frames. 13th World Conference on Earthquake Engineering. 2004. 12 p.
- [76]. Mele E, Toreno M, Brandonisio G, De Luca A. Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. The Structural Design of Tall and Special Buildings 2014. 23. pp. 124-145
- [77]. Kim J., Jun Y., Ho Lee Y. Seismic Performance Evaluation of Diagrid System Buildings. 2nd Specialty Conference on Disaster Mitigation. 2010. pp. 1932-1936
- [78]. Baker W., Besjak C., Sarkisian M., Lee P., Doo C.S. Proposed Methodology to Determine Seismic Performance Factors for Steel Diagrid Framed Systems. CTBUH 13th U.S. Japan Workshop. 2010. 14 p.
- [79]. Fu X, Wu B, Chen XC, Meng ML, Sun C. Research on structural design of a super high-rise building in Qatar. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering 2008.1. pp. 186-197
- [80]. Taghizadeh K, Seyedinnoor S. Super-Tall Buildings Forms Based on Structural Concepts and Energy Conservation Principles. Architecture Research 2013. 3. pp.13-19
- [81]. Winter U.M, Terwel I.K, Van Eerden I.S, Everts I.H. Super High Rise in Rotterdam. Structural Engineering. 2011. Vol. 1. pp. 186-197
- [82]. Carroll C., Gibbons C., Ho G., Kwok M., Lee A. CCTV Headquarters, Beijing, China: Building the structure. The Arup Journal. 2008. pp. 40-50
- [83]. Carroll C., Duan X., Gibbons C., Lawson R., Lee A. China Central Television Headquarters-Structural Design. Steel Structures 2006. 6. pp. 387-391.
- [84]. Stromberg L.L, Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. 43. pp. 165-180
- [85]. Park K., Holt N. Parametric Design Process of a Complex Building In Practice Using Programmed Code As Master Model. International Journal of Architectural Computing. 2010. 8. pp. 359-376
- [86]. Moon K.S. Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. Architectural Science Review 2008. 51. pp. 239-251
- [87]. Panchal N.B., Patel V.R., Pandya I.I., Optimum Angle of Diagrid Structural System, International Journal of Engineering and Technical Research. 2014. Vol. 2. No. 6. pp. 150-157.
- [88]. Sundberg J.N. A computational approach to the design of free form diagrid structure. Massachusetts Institute of Technology. USA. 2009. 82 p.
- [89]. David S., Farnsworth D., Jackson M., Clark M. The Effects of Complex Geometry on Tall Towers. Wiley Interscience. 2007. 2. pp. 441-455
- [90]. Mousavi F. 30 St. Mary Axe. Harvard Design Magazine 2012. 35. pp. 54-59
- [91]. Fu J.Y., Wu J.R., Xu A., Li Q.S., Xiao Y.Q. Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower. Engineering Structures. 2012. 35. pp. 120-139

- [93]. Subramonian N., Subramanian G. Lateral buckling of a simply supported uniform diagrid. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1970. Vol. 12. Iss. 1. pp. 35-38.
- [94]. Bandi E. K., Tamura Y., Yoshida A., Kim Y.C., Yang Q. Experimental investigation on aerodynamic characteristics of various triangular-section high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. pp. 60-68
- [95]. Meza E.G., Diaz J.A. Shapes and behavior of triangular grid structures. *Current trends in architecture of the 21th Century. Structures and Architecture*. 2013. pp. 1395-140.
- [92]. Lee D., Shin S. Advanced high strength steel tube diagrid using TRIZ and nonlinear pushover analysis. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 96. pp. 151-158
- [93]. Subramonian N., Subramanian G. Lateral buckling of a simply supported uniform diagrid. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1970. Vol. 12. Iss. 1. pp. 35-38.
- [94]. Bandi E. K., Tamura Y., Yoshida A., Kim Y.C., Yang Q. Experimental investigation on aerodynamic characteristics of various triangular-section high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. pp. 60-68
- [95]. Meza E.G., Diaz J.A. Shapes and behavior of triangular grid structures. *Current trends in architecture of the 21th Century. Structures and Architecture*. 2013. pp. 1395-1402

Семашкина Д.О., Назмеева Т.В. Диагонально-сетчатые оболочки в качестве несущих систем зданий // Alfabuild. 2019. №2(9). С. 40-61.

Semashkina D.O., Nazmееva T.V. Diagrid structures as load-bearing systems of buildings. Alfabuild, 2019, 2(9), Pp. 40-61. (rus)

Diagrid structures as load-bearing systems of buildings

D.O. Semashkina¹, T.V. Nazmeeva²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

² Steel construction development Association, 19b1, Ostozhenka st., Moscow, 119034

Article info

review article

Abstract

The article is devoted to one of the tendencies of modern high-rise construction - diagrid bearing structures. Such type of load-bearing system have become a popular solution in recent decades for buildings with different functional purposes, shapes, heights and spans, due to their simultaneous constructive efficiency and architectural expressiveness. Also diagrid structures are able to adapt and provide structural support to a wide range of non-rectilinear geometric shapes. The author considers the history of development and the prerequisites for the application of diagonal-grid shell systems as the main structural framework of buildings, including unique ones. The main projects with the use of diagrid structural systems as well as studies related to similar structures were analyzed. The main directions in the construction of high-rise buildings were disassembled.

Keywords:

load-bearing system, frame, diagrid system, building structures, unique buildings, metal frame

¹ Corresponding author

1. +7(981)1532171, daria.semashkina@gmail.com (Semashkina Daria, undergraduate)

2. +7(921)5451545, naztv@mail.ru (Nazmeeva Tatiana, candidate of science)