Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 1 (64). 2018. 36-49

Construction of Unique Buildings and Structures

journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru

Сетчатые оболочки в качестве каркаса невысотных зданий

Д.О. Семашкина [1*]

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ИСТОРИЯ	КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА
doi: 10.18720/CUBS.64.3	Подана в редакцию: 17.11.2017	сетчатая оболочка; каркас здания; металлический каркас; несущие конструкции; диагональные конструкции;

АННОТАЦИЯ

Сетчатые несущие оболочки в последние десятилетия стали довольно часто использоваться в качестве основного каркаса для высотных зданий, благодаря из конструкционной эффективности и уникальной геометрии, позволяющих воплощать самые неординарные архитектурные решения как в форме самого здания, так и в его планировке. Автор данной статьи рассматривает возможность применения сетчатых оболочек для каркаса невысотных зданий общественного назначения и эффективность такого решения. В статье приводится разработка оболочкового каркаса и его расчет на воздействие нагрузок. По результатам расчетов произведено сравнение оболочкового каркаса с каркасом с регулярной сеткой колонн. Сделаны выводы о эффективности использования сетчатой оболочки здания.

Содержание

1. Введение 37
2. Методы 37
3. Результаты расчетов 42
4. Результаты подбора сечения металлоконструкций 43
5. Обсуждение 46
6. Заключение 46

Контактная информация:

1* +7(981)1532171, daria.semashkina@gmail.com(Семашкина Дарья Олеговна, студент)

1. Введение

В последние 10-20 лет так называемые сетчатые диагональные оболочки (diagrid structures) становятся все более популярным решением при выборе конструктивной схемы зданий с различным назначением, формой, высотой и пролетами. 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. Также внутри здания могут создаваться дополнительные сетчатые элементы, которые образуют собой ядра жесткости. Полная замена колонн возможна благодаря тому, что сетчатые оболочки одинаково хорошо воспринимают как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки на здание, а также уменьшают сдвиговые и изгибные деформации из-за характера работы наклонных элементов.

К другим конструктивным преимуществам сетчатых оболочек относятся:

- повышенная устойчивость, благодаря треугольным элементам;

- обеспечение множества вариантов распределения нагрузки и снижение возможности разрушения;

- уменьшение собственного веса конструкций;

- снижение материалоемкости.

С архитектурной точки зрения данные конструкции также имеют ряд плюсов:

- 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.

Основоположником конструктивных решений сетчатых оболочек стал выдающийся российский инженер Шухов В.Г. [1]. Инженером Шуховым была разработана и построена первая в мире башня на основе сетчатой гипербалоидной оболочки [2]. Однако, в наши дни возведение подобных конструкций и основные разработки по данной тематике ведутся за рубежом. Активные исследования проводят Boake T.M. [3,4], Moon K. [5-10], Mele E [11-12]. Некоторые зарубежные авторы рассматривают преимущества сетчатых оболочек в качестве каркаса высотных зданий сложной архитектурной формы [13-21]. Принципы работы и возможности данных конструкций описывают в своих работах множество российских исследователей [22-25].

Цель данной работы – определить эффективность применения сетчатых оболочек в качестве основной несущей конструкции многоэтажного невысотного здания общественного назначения в сравнении с традиционным рамным каркасом с регулярной сеткой колонн.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть следующие задачи:

- Разработать оболочковую и рамную конструкции для заданного здания
- Собрать постоянные, полезные, снеговые и ветровые нагрузки на каркас здания
- Выполнить расчет конструкций на статические нагрузки
- Осуществить подбор сечений
- Сравнить полученные результаты и сделать выводы о эффективности оболочковой системы для невысотных сооружений

2. Методы

Для анализа вариантов конструктивной схемы было выбрано квадратное в плане здание размерами в осях 40x40 и высотой в 18 этажей по 4 метра каждый. Соотношение высоты к ширине здания – 1,8. Внутри здания предполагается устройство атриума размерами 10x10 м. (рис. 1)

Рисунок 1. План разрабатываемого здания с балочной сеткой

При данных параметрах были разработаны 2 схемы несущих конструкций: рамный каркас (рис.2а) и конструкция с сетчатой оболочкой (рис.2б)

Моделирование и расчёт конструкций произведен в ПК ЛИРА-САПР.

а) Рамный **б) Сетчатый**

Рисунок 2. Модели каркасов

Характеристики рамного каркаса:

- Шаг колонн в направлении оси Х и оси У - 5 м
- Сечение колонн – двутавры колонного типа

- Балочная сетка с размерами ячейки 5х5 м
- Сечение балок – двутавры балочного типа
- Примыкание балок к колоннам и колонн к фундаменту – жесткое
- Фундаментная плита толщиной 1200 мм на абсолютно жестком основании
- Перекрытия – пустотные плиты (приведенная толщина 120 мм)

Характеристики сетчатого каркаса:

- Две оболочковых системы: по контуру здания и по контуру атриума
- Угол наклона диагональных элементов к горизонту 58°
- Сечение диагональных элементов – коробчатое сечение из двутавров колонного типа
- Шаг дополнительных вертикальных элементов сетки 5 м
- Сечение стоек – двутавры колонного типа

- Балочная сетка с размерами ячейки 5х5 м
- Сечение балок – двутавры балочного типа
- Примыкание балок к оболочковым элементам и оболочки к фундаменту – жесткое
- Фундаментная плита толщиной 1200 мм на абсолютно жестком основании
- Перекрытия – пустотные плиты (приведенная толщина 120 мм)

Сбор нагрузок на каркас здания приведен в таблице 1. Нагрузки от веса ограждающих конструкций и полов вычислены в соответствии с условно принятыми «пирогами» данных конструкций. Полезная нагрузка для общественных зданий, а также снеговая нагрузка для Санкт-Петербурга и все коэффициенты надежности по нагрузкам определены согласно СП 20.13330.2016. «Нагрузки и воздействия». Схемы приложения нагрузок представлены на рис. 3-5.

Таблица 1. Нагрузки на каркас

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузк q_n	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетная нагрузка q
1	Вес несущих конструкций	Задана автоматическ	1,1	Задана автоматически
2	Вес ограждающих конструкций	0,3 т/м	1,2	0,36 т/м
3	Вес полов и кровли	0,1 т/м^2	1,2	0,12 т/м^2
4	Полезная нагрузка на перекрытия	0,2 т/м^2	1,2	2,4 т/м^2
5	Снеговая нагрузка	0,13 т/м^2	1,4	0,18 т/м^2

Рисунок 3. Зоны приложения нагрузки от ограждающих конструкций и парапета

Рисунок 4. Зоны приложения веса полов и полезной нагрузки на перекрытия

Рисунок 5. Зоны приложения нагрузки от кровли и снега (с учетом зон снеговых мешков по контуру здания)

Значения статической ветровой нагрузки получены в соответствии с методикой, описанной в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». В ходе работы учитывалась только статическая составляющая ветровой нагрузки. Динамический расчет каркасов здания в рамках данной работы не производился.

Ветровая нагрузка прикладывается по оси X с наветренной и подветренной сторон (рис.6).

Рисунок 6. Схема приложения и значения ветровой нагрузки

3. Результаты расчетов

Проанализируем результаты расчета моделей каркаса.

а) Рамный **б) Сетчатый**

Рисунок 7. Деформированная схема каркаса

Как видно из деформированных схем здания, рамный каркас испытывает большие изгибающие усилия, так как воспринимает ветровую нагрузку вертикальными элементами. Оболочковый каркас, напротив, воспринимает ветровую нагрузку наклонными элементами из-за чего создается эффект осевого действия, что значительно уменьшает деформации.

Однако, в пролете оболочкового каркаса из-за большой его величины возникают значительные прогибы, для компенсации которых потребуется довольно развитое сечение балок, что существенно сократит полезный объем этажа.

Проанализируем перемещения каркасов по оси X от ветровой нагрузки и суммарные перемещения по оси Z.

Рисунок 8. График зависимости перемещений каркаса по оси X от этажа

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 ветровая нагрузка, а следовательно, 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, однако для данной высоты здания эффективность такой работы не столь существенна.

Деформации рамного каркаса от ветровой нагрузки по оси X даже для невысотного здания превосходят деформации оболочкового каркаса более чем в 10 раз, при этом колонны рамного каркаса испытывают большие изгибающие моменты (максимальный изгибающий момент в рамном каркасе 6,03 т·м, в сетчатом 0,8 т·м). Стоит отметить, что данные перемещения получены без учета пульсационной ветровой нагрузки на здание, следует ожидать, что учет пульсационной составляющей только увеличит разброс в показаниях по горизонтальным отклонениям, так как динамическое воздействие будет играть большую роль для рамного каркаса. Однако для данной высоты здания максимальные перемещения по оси X для двух каркасов находятся в пределах допускаемых значений с большим запасом и учет пульсационной нагрузки не приведет к критическим отклонениям верха здания (допускаемое перемещения для данной высоты здания – 144 мм по СП 20.13330.2016).

а) Сетчатый каркас **б) Рамный каркас**

Рисунок 9. Прогибы плиты перекрытия

Суммарные перемещения по оси Zy сетчатого каркаса в два раза превосходят перемещения рамного каркаса, что объясняется отсутствием вертикальных несущих элементов во внутреннем пространстве здания. Зоны распространения максимальных прогибов в сетчатом каркасе меньше чем у рамного каркаса.

4. Результаты подбора сечения металлоконструкций

Для подбора сечений металлопроката была произведена унификация элементов каркаса. Разбиение каркаса на унифицированные элементы проводилось согласно конструктивным и монтажным требованиям. Балки перекрытий были разделены на 3 группы, в зависимости от примыкания к другим элементам конструкции. Наклонные элементы оболочкового каркаса, исходя из сложности конструирования неортогональных узловых соединений, были разбиты на две группы: элементы внешней оболочки и элементы ядра жесткости, без разделения по высоте на отдельные блоки. Колонны для удобства разбиения на отправочные марки были разбиты на конструктивные элементы в пределах двух этажей общей высотой 8 м.

Таким образом, были введены следующие группы конструктивных элементов каркаса с унификацией сечения:

- Балки пролета

- Балки по контуру атриума
- Балки по контуру здания
- Колонны в пределах двух этажей
- Наклонные элементы для оболочки
- Наклонные элементы ядра жесткости

В результате расчета были подобраны сечения элементов конструкции. Результаты подбора приведены в табл.2 и табл.3

Изменение по высоте сечений колонн для каркасов представлены на рис. 10-11.

Таблица 2. Результаты подбора элементов сетчатого каркаса

Элемент	Подобранное сечение	Количество элементов/ длина элементов (м)
Колонна К4	I35K5	192/4
Колонна К3	I40K2	192/4
Колонна К2	I40K3	176/4
Колонна К1	I40K4	112/4
Колонна К6	I40K5	32/4
Колонна К5	I40K6	16/4
Балка	I50Б1	2504/1,25
Балка	I60Б1	376/1,25
Балка	I70Б1	7200/1,25
Раскос	2I23K2	576/4,5
Раскос	2I26K3	144/4,5

Итоговая металлоемкость каркаса: 2359 т

а)Внешняя оболочка **б)Ядро жесткости**

Рисунок 10. Изменение по высоте сечений колонн оболочкового каркаса (профили соответствуют табл. 2)

Таблица 3. Результаты подбора элементов рамного каркаса

Элемент	Подобранное сечение	Количество элементов/ длина элементов (м)
Колонна К7	I26К3	320/4
Колонна К6	I26К4	160/4
Колонна К5	I30К1	160/4
Колонна К4	I30К2	160/4
Колонна К3	I30К3	160/4
Колонна К2	I35К1	320/4
Колонна К1	I40К*	160/4
Балка	I40Б2	2880/1,25
Балка	I45Б2	7200/1,25

Итоговая металлоемкость каркаса: 1342 т

Рисунок 11. Изменение по высоте сечений колонн рамного каркаса (профили соответствуют табл. 3)

Как видно из результатов расчета, расход металла на сетчатый каркас превосходит значения для рамного каркаса практически в два раза, что объясняется большой величиной пролета, а значит, и большими изгибающими моментами внутри балочной сети, которые требуют для компенсации развитых сечений элементов конструкции.

Таким образом, для данного невысотного здания с большим пролетом использование сетчатого каркаса экономически неэффективно.

5. Обсуждение

В ходе данной работы было разработано и проанализировано два варианта конструктивной схемы для многоэтажного невысотного здания общественного назначения. В качестве первого варианта рассматривался классический металлический рамный каркас с регулярной сеткой колонн. В качестве второго варианта был разработан сетчатый металлический каркас.

В результате анализа расчетов двух вариантов конструкций можно сделать следующие выводы:

1. Сетчатый каркас показывает свою эффективность в работе на ветровую нагрузку, благодаря наклонным элементам конструкции, раскладывая горизонтальную нагрузку на составляющие;
2. Сетчатый каркас показывает меньшие значения деформаций сжатия по высоте здания для вертикальных элементов;
3. Сетчатый каркас дает большую свободу в планировке интерьера, благодаря отсутствию вертикальных несущих элементов внутри пространства здания;

Однако,

1. Для данной конструкции здания и высоты эффективность сетчатого каркаса не существенна, т.к. и рамный каркас обеспечивает перемещения в пределах допускаемого;
2. Рамный каркас допускает меньшие вертикальные перемещения внутри пролета;
3. Рамный каркас обеспечивает более равномерное распределение нагрузки на вертикальные элементы конструкции;
4. Металлоемкость рамного каркаса практически в два раза меньше чем у сетчатого каркаса.

Таким образом, применение сетчатого оболочкового каркаса для невысотных зданий с соотношением высоты к размерам в плане – 1,8 экономически неэффективно.

Также стоит учитывать следующие факторы:

- при расчете каркасов здания учитывались только статические нагрузки, таким образом необходимы дальнейшее сравнение динамических характеристик разработанных схем;
- при унификации наклонных элементов оболочки не было произведено деление на блоки по высоте здания, из-за сложности конструирования множества различных неортогональных узлов металлоконструкций, что отразилось на итоговой металлоемкости каркаса.

Предположительно, учет работы на динамические воздействия двух каркасов увеличит экономическую целесообразность применения диагонально-сетчатых оболочковых конструкций.

Исследования других авторов, таких как Mele E. [10], Paresh V.Patel, Khushbu Jani [13], Nishith B. Panchal, Vinubhai R. Patel [18], в сравнении различных каркасных систем с диагональными оболочковыми системами, однако, показывают большую эффективность для зданий с большими высотами или меньшими габаритами в плане. Результаты их работы свидетельствуют о возможности снижения материалоемкости всего каркаса здания до 20% при применении оболочкового каркаса с диагональными элементами.

6. Заключение

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, которые влияют не только на их конструктивную, но и экономическую эффективность применения данных конструкций. Особое внимание стоит обращать на геометрические 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.

Литература

[1]. Grefe R., Perchi O., Shukhov F. V., Gappoyev M.M. Shukhov (1853-1939). Art of design. M., 1994. 192 p.

[2]. Elizabeth C. English. Vladimir Shukhov and the Invention of Hyperboloid Structures. Conference Information. Structures Congress. 2005. 9 p

[3]. Boake T. M. Diagrid Structures: systems, connections, details. Birkhäuser, 2014. 184 p.

[4]. Boake T. M. Diagrid Structures: Innovation and Detailing. Structures and Architecture (New concepts, applications and challenges), London, Taylor&Francis Group, 2013. Pp. 991-998.

[5]. Moon K. Design and Construction of Steel Diagrid Structures. School of Architecture. Yale University. New Haven. USA. 2009. Pp. 398-405.

[6]. Moon K., Connor, J. J., Fernandez, J. E. The structural design of tall and special buildings. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. 2007. Pp. 205-230.

[7]. Moon K., 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. Vol. 16.2. 2009 Pp. 205- 223.

[8]. Moon K. Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. Procedia Engineering. No 14. 2011 Pp. 1343-1350.

[9]. Moon K. Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. Architectural Science Review 51. 2008 Pp. 239-251.

[10]. Moon K. Sustainable Design of Braced Tube Structures: The Role of Geometric Configuration. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. No 2. 2011. Pp. 229-236.

[11]. Mele E., M. Toreno, G. Brandonisio, A. De Luca. Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. The Structural Design of Tall and Special Buildings Vol.2. 2012. Pp. 124-145.

[12]. Mele E., Montuori G.M., G. Brandonisio, A. De Luca Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. Engineering Structures. Vol. 71. 2014. Pp. 112-127

[13]. Korsavi S, Maqhareh M.R. The Evolutionary Process of Diagrid Structure Towards Architectural, Structural and Sustainability Concepts: Reviewing Case Studies. J Archit Eng Tech. Vol 3. 2014 Pp 2-12.

[14]. Khushbu Jani, Paresh V.Patel Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings. Procedia Engineering. Vol. 51. 2013. Pp. 92-100.

[15]. Barry C., McDonnell T. The Bow: Unique Diagrid Structural System for a Sustainable Tall Building. 2008. 5 p.

[16]. 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. Vol. 69. 2014. Pp. 90-101.

[17]. 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. Vol. 33. Iss. 7. 2011. Pp. 2134-2144.

[18]. 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.

[19]. Nishith B. Panchal, Vinubhai R. Patel Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. Pp. 374-378.

[20]. Saket Yadav, Dr. Vivek Garg Advantage of Steel Diagrid Building Over Conventional Building International. Journal of Civil and Structural Engineering Research. Vol. 3, Issue 1, Pp 394-406.

[21]. H. Tripathi, S. Singla Diagrid Structural System for R.C.framed Multistoreyed Buildings. International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 7. Issue 6. 2016. Pp 673-691.

[22]. Шуллер В. Конструкции высотных зданий. Стройиздат, 1979. 248 с.

[23]. Дыховичный Ю.А., Жуковский Э.З. и др. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник. М.: Высшая школа, 1991. 543 с.

[24]. Ковалева Е.А., Ковалева Л.В., Афанасьев Д.Н. Гиперболоидные конструкции В.Г. Шухова – применение в современном строительном производстве // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2015. № 1. С. 157–160.

[25]. Ахметзянов Р.И., Данченко Л.В., Рыбалкина Р.И. Геометрические и конструктивные особенности гиперболоидных конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета.2014. № 4. С. 59-64.

Diagrid systems for low-rise buildings

D.O. Semashkina [1]*

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

Article info

scientific article

doi: 10.18720/CUBS.64.3

Article history

Received 17.11.2017

Keywords

diagrid system;
building frame;
metal frame;
structural units;
diagrid structure;

ABSTRACT

In the recent time diagrid structures are often used as the main framework for high-rise buildings due to structural efficiency and unique geometry. Structural features of this system allow to design the most innovative architectural solutions in the form and layouts of the building. Author of this article consider the possibility of using diagrid system for construction of low-rise public buildings and the effectiveness of such solution. The article describes the design of the shell frame and the calculation this of impact loads. The calculation results were compared with a structure with regular grid of columns. Conclusions about the effectiveness of the use of diagrid structures are described.

Contact information:

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

References

[1]. Grefe R., Perchi O., Shukhov F. V., Gappoyev M.M. Shukhov (1853-1939). Art of design. M., 1994. 192 p.

[2]. Elizabeth C. English. Vladimir Shukhov and the Invention of Hyperboloid Structures. Conference Information. Structures Congress. 2005. 9 p

[3]. Boake T. M. Diagrid Structures: systems, connections, details. Birkhäuser, 2014. 184 p.

[4]. Boake T. M. Diagrid Structures: Innovation and Detailing. Structures and Architecture (New concepts, applications and challenges), London, Taylor&Francis Group, 2013. Pp. 991-998.

[5]. Moon K. Design and Construction of Steel Diagrid Structures. School of Architecture. Yale University. New Haven. USA. 2009. Pp. 398-405.

[6]. Moon K., Connor, J. J., Fernandez, J. E. The structural design of tall and special buildings. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. 2007. p. 205-230.

[7]. Moon K., 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. Vol. 16.2. 2009 Pp. 205- 223.

[8]. Moon K. Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. Procedia Engineering. No 14. 2011 Pp. 1343-1350.

[9]. Moon K. Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. Architectural Science Review51. Pp. 239-251.

[10]. Moon K. Sustainable Design of Braced Tube Structures: The Role of Geometric Configuration. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. No 2. 2011. Pp. 229-236.

[11]. Mele E., M. Toreno, G. Brandonisio, A. De Luca. Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. The Structural Design of Tall and Special Buildings Vol.2. 2012. Pp. 124-145.

[12]. Mele E., Montuori G.M., G. Brandonisio, A. De Luca Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. Engineering Structures. Vol. 71. 2014. Pp. 112-127

[13]. Korsavi S, Maqhareh M.R. The Evolutionary Process of Diagrid Structure Towards Architectural, Structural and Sustainability Concepts: Reviewing Case Studies. J Archit Eng Tech. Vol 3. 2014 Pp 2-12.

[14]. Khushbu Jani, Paresh V.Patel Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings. Procedia Engineering. Vol. 51. 2013. Pp. 92-100.

[15]. Barry C., McDonnell T. The Bow: Unique Diagrid Structural System for a Sustainable Tall Building. 2008. 5 p.

[16]. 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. Vol. 69. 2014. Pp. 90-101.

[17]. 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. Vol. 33. Iss. 7. 2011. Pp. 2134-2144.

[18]. 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.

[19]. Nishith B. Panchal, Vinubhai R. Patel Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. Pp. 374-378.

[20]. Saket Yadav, Dr. Vivek Garg Advantage of Steel Diagrid Building Over Conventional Building International. Journal of Civil and Structural Engineering Research. Vol. 3, Issue 1, Pp 394-406.

[21]. H. Tripathi, S. Singla Diagrid Structural System for R.C.framed Multistoreyed Buildings. International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 7. Issue 6. 2016. Pp 673-691.

[22]. Shuller V. Konstruktsii vysotnykh zdaniy. [Structures of high-rise buildings]. Stroyizdat, 1979. 248 p. (rus)

[23]. Dykhovichnyy Yu.A., Zhukovskiy E.Z. i dr. Sovremennyye prostranstvennyye konstruktsii (zhelezobeton, metall, derevo, plastmassy): Spravochnik. [Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics): Reference book]. M.: Vysshaya shkola, 1991. 543 p. (rus)

[24]. Kovaleva Ye.A., Kovaleva L.V., Afanasyev D.N. Giperboloidnyye konstruktsii V.G. Shukhova – primeneniye v sovremennom stroitelnom proizvodstve. [Herboloid structures of V.G. Shukhov - application in the modern construction industry]. Dalniy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitelnogo kompleksa. 2015. № 1. Pp. 157–160. (rus)

[25]. Akhmetzyanov R.I., Danchenko L.V., Rybalkina R.I. Geometricheskiye i konstruktivnyye osobennosti giperboloidnykh konstruktsiy. [Geometric and structural features of hyperboloid structures]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitelnogo universiteta.2014. № 4. Pp. 59–64.(rus)

Семашкина Д.О., Сетчатые оболочки в качестве каркаса невысотных зданий, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2018, № 1 (64). С. 36-49.

Semashkina D.O Diagrid systems for low-rise buildings, Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 1 (64). Pp. 36-49. (rus)