

Диагонально-сетчатые несущие конструкции в высотных зданиях

О.В. Якуба¹, А.В. Бардин²

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет», 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Информация о статье

УДК 624.074.43

Статья о новом оборудовании, материалах, технике и технологиях

История

Подана в редакцию 11 июня 2014
Принята 10 июля 2014

Ключевые слова

диагонально-сетчатые несущие конструкции в высотных зданиях, несущая стальная оболочка, диагональная сетка, триангулированная стальная решетка, высотные здания.

АННОТАЦИЯ



В статье рассматривается применение диагонально-сетчатой несущей конструкции на примере высотного здания.

Высотные здания представляют собой уникальные сооружения, имеющие высоту свыше 100 метров и представляющие собой сложные объекты строительства.

Одним из самых опасных факторов, влияющих на высотные здания, является ветер, способный нарушить целостность ограждающих конструкций и привести к невозможности эксплуатировать здание. Помимо ветровой нагрузки, при проектировании высотных зданий необходимо учитывать сейсмостойкость сооружения и давление, которое оно оказывает на грунт. Как и любое уникальное сооружение, высотное здание является очень дорогостоящим объектом строительства, включающим в себя помимо проектных и строительных работ также и научные изыскания, поэтому при проектировании подобного рода сооружений всегда стараются снижать стоимость его строительства путем применения передовых строительных технологий. К одной из передовых и набирающих популярность строительных технологий относятся диагонально-сетчатые несущие конструкции – «Diagrid».

Содержание

1.	Введение	83
2.	Обзор литературы	83
3.	Постановка задачи	83
4.	Описание исследования	83
5.	Заключение	86

1

Контактный автор:

+7 (911) 903 8822, yakuba.olka@gmail.com (Якуба Ольга Вячеславовна, бакалавр)

2

+7 (931) 354 6847, kmbav@gmail.com (Бардин Алексей Владимирович, бакалавр)

1. Введение

Строительные условия в современных городах, большая плотность застройки, дороговизна земельных участков, привели к буму высотного строительства, призванного обеспечить людей комфортным и безопасным пространством для работы, жизни и отдыха в условиях плотной городской застройки. Помимо обеспечения функциональных задач, высотное здание также должно обладать выразительным архитектурным обликом [11, 13].

Одной из передовых технологий, призванных обеспечить все требования, предъявляемые к высотному зданию, является диагонально-сетчатые несущие конструкции.

Структурная эффективность и гибкость системы диагонально-сетчатых несущих конструкций уже сделали её одной из самых популярных конструкций при проектировании как уникальных, так и обычных зданий, и сооружений.

2. Обзор литературы

Диагонально-сетчатые несущие конструкции получили большое распространение за границей и до недавнего времени не имели широкого распространения в России.

Пионером в разработке диагонально-сетчатых конструкций был русский инженер Шухов В.Г. [1], изучение свойств диагонально-сетчатых несущих конструкций на примере высотных зданий проводят Kyoung-Sun Moon, Jerome J. Connor и John E. Fernandez [2], большой вклад в развитие диагонально-сетчатых оболочек сделали Ричард Б. Фуллер [3], Воаке Т.М [4].

3. Постановка задачи

Актуальность изучения диагонально-сетчатых несущих конструкций растёт с потребностью внедрения их в промышленное и гражданское строительство. Однако в современной отечественной научно-технической литературе практически отсутствуют публикации по теме исследования.

Целью работы является изучение конструкции диагонально-сетчатых несущих конструкций, определение преимуществ их применения по сравнению с традиционными видами конструктивных схем высотных зданий.

4. Описание исследования

Диагонально-сетчатые несущие конструкции представляют собой пространственные фермы, которые состоят из серии триангулированных (геодезических) ячеек – решетки.

Первые в мире несущие сетчатые оболочки перекрытий и башен были построены в 1896 году Владимиром Шуховым для XVI Всероссийской промышленной и художественной выставки в Нижнем Новгороде. Его постройкой являлась ажурная сетчатая стальная гиперboloидная водонапорная башня.

Однополостный гиперboloид вращения первой башни Шухова образован 80 прямыми стальными профилями, концы которых крепятся к кольцевым основаниям. Сетчатая стальная оболочка из ромбовидно пересекающихся профилей упрочнена 8 параллельными стальными кольцами, расположенными между основаниями. Высота гиперboloидной оболочки башни — 25,2 метра (без учёта высот фундамента, резервуара и надстройки для обозрения). Диаметр нижнего кольцевого основания — 10,9 метра, верхнего — 4,2 метра. Максимальный диаметр бака — 6,5 метра, высота — 4,8 метра [3].

На сегодняшний день диагонально-сетчатые несущие конструкции повсеместно применяются как в уникальных высотных, так и в относительно простых зданиях и сооружениях (см. рисунки 1-4).

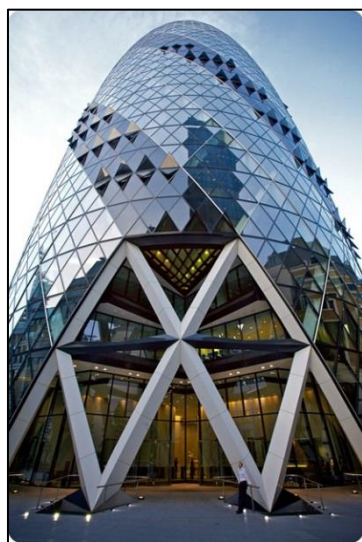


Рисунок 1. Здание Сент-Мэри Экс 30, Н. Фостер, Лондон



Рисунок 2. Небоскреб «Capital Gate», Абу-Даби

Одним из наиболее известных зданий, построенных с использованием диагонально-сетчатых несущих конструкций, является небоскреб «Сент-Мэри Экс 30» за авторством архитектурного бюро «Foster and Partners» (см. рисунок 1) [12]. Высота здания 180 метров, включает в себя 40 этажей. Опорный каркас выполнен из стальных труб, пересекающихся по треугольной схеме. Здание имеет в основании сечение 49 м, увеличивающееся затем до 57 м на уровне 17-го этажа и постепенно уменьшающееся до 26 м к 39-му этажу. Сверху здание покрыто стеклянной «линзой», имеющей форму полусферы, которая является единственным компонентом, имеющим гнущее стекло. На основной конструкции к раме крепится плоское листовое стекло [6].

«Ворота Столицы» («Capital Gate») — небоскреб высотой 180 метров (35 этажей), расположенный в Абу-Даби (см. рисунок 2). Он наклоняется в 18 градусов на запад, что в четыре раза больше, чем известная Пизанская башня. Чтобы сделать такой наклон возможным, центральное ядро здания наклоняется в противоположном направлении к основной структуре, и выправляется по мере роста вверх. Здание построено на бетонной основе 7 футов глубиной. Диагонально-сетчатая несущая конструкция опирается на установку из 490 труб, которые всверлены на 30 метров под землю, чтобы противодействовать гравитационным факторам, таким как ветер и сейсмические воздействия.

Главной особенностью диагонально-сетчатых несущих конструкций является диагональная каркасная система, способная нести как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки. По сравнению с традиционными стальными несущими конструкциями без диагоналей, диагонально-сетчатые конструкции более эффективно сопротивляются горизонтальному сдвигу, так как сдвиговую нагрузку несут диагональные элементы (работают на сжатие и растяжение), в то время как традиционные стальные несущие конструкции воспринимают сдвиг на изгиб вертикальных колонн, что может привести к потере устойчивости [3,23-29].

Оптимальность угла наклона диагональных элементов была определена исследованиями Kyoung Sun Moon из Ельского университета. Исследования проводились на примере 40, 60 и 80 этажных зданий с высотой этажа 3,6 м и площадью этажа 36,0 м x 36,0 м. Для здания высотой 60 этажей оптимальным был принят угол 69°. Расположение диагональных элементов с таким углом раскрытия в ячейке позволяет наиболее полно распределять нагрузки по всей диагонально-сетчатой несущей конструкции, как следствие наиболее полно задействовать сечение и более эффективно расходовать материалы. Полученный угол изменяется в зависимости от геометрической характеристики плана здания, высоты этажа и высота всего здания [7, 18-22].

Конфигурация диагонально-сетчатых несущих конструкций позволяет экономить до 20% веса стали по сравнению с традиционными несущими конструкциями и обеспечивать свободу объемно-планировочных и архитектурных решений.



Рисунок 3. Бардин А.В. Диагонально-сетчатая несущая оболочка на примере высотного комплекса

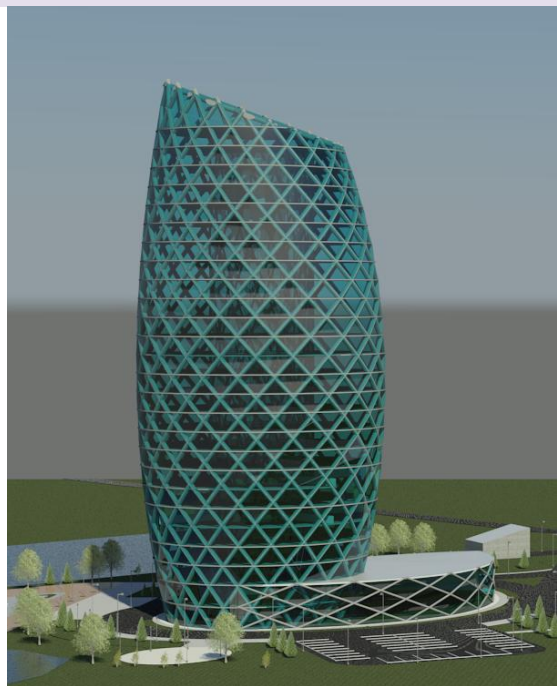


Рисунок 4. Якуба О.В. Диагонально-сетчатая несущая оболочка на примере высотного комплекса

Основной проблемой диагонально-сетчатых несущих конструкций является конструктивность. В связи с тем, что узлы у диагональных систем значительно сложнее, чем у ортогональных, возрастает и цена такого типа несущих конструкций. Поэтому используют узлы заводского изготовления, позволяющие снизить трудоемкость при их монтаже. В связи с особенностью треугольной конфигурации сетки – каждая ячейка является жестким диском – жесткие связи в узлах не обязательны [14].

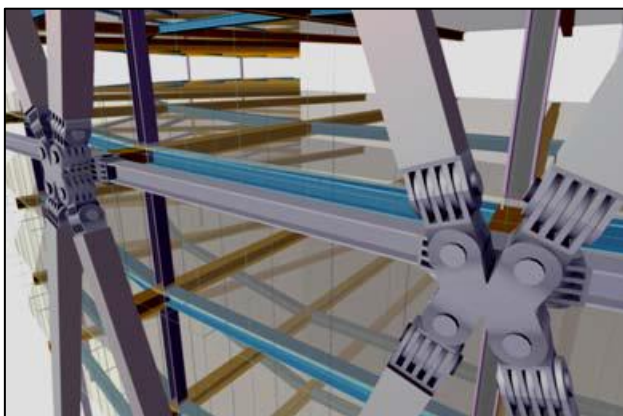


Рисунок 5. Moon K. [9]. Деталь узла для здания с диагонально-сетчатой конструкцией свободной формы

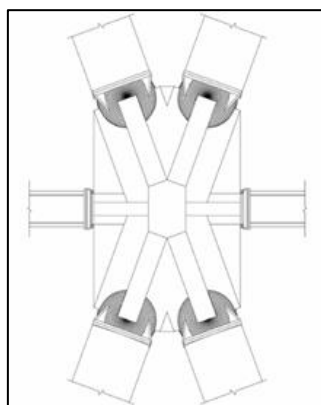


Рисунок 6. Moon K. [9]. Деталь узла для здания с диагонально-сетчатой свободной формы

Для зданий, прямоугольных в плане, изготовление узлов заводским методом может быть весьма экономичным решением, так как все узлы имеют одинаковую конфигурацию (см. рисунок 5) [8].

При меняющейся форме здания, изготовление узлов значительно усложняется и удорожается. В настоящее время, с помощью технологий 3D проектирования, существует возможность создания различных узлов, отвечающих меняющейся форме здания. Основной идеей при проектировании таких узлов является создание универсальной связи, тем самым исключив производство многочисленных узлов различной конфигурации (см. рисунки 6-7) [9, 30, 31].

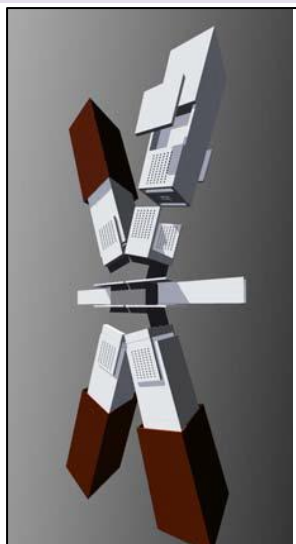


Рисунок 7. Moon К. [9]. Фрагмент узлового соединения в зданиях прямоугольной формы



Рисунок 8. Журнал АВОК [6]. Наружное остекление здания. Видны треугольные окна световых шахт с механическими приводами, предусмотренные для использования в системе вентиляции

На сегодняшний день остекление фасадов является самым популярным средством архитектурной выразительности здания. Диагонально-сетчатые несущие конструкции позволяют воплотить в жизнь различные фантазии архитекторов. Структурная эффективность и гибкость системы диагональной сетки уже сделали её одной из самых популярных конструкций при проектировании зданий и сооружений [6].

Конфигурация и эффективность диагонально-сетчатых несущих конструкций уменьшают число её структурного элемента, требуемого на фасаде здания, поэтому больше вариантов оформления внешнего вида. За счет своей структурной эффективности, диагонально-сетчатые несущие конструкции позволяют существенную гибкость с планом этажа.

Как правило, в зданиях, особенно с криволинейной формой, используют триангулированное остекление, за счет его легкой адаптации на фасаде здания. Использование треугольной геометрией работает как "сетка", чтобы позволить аппроксимацию (научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в том или ином смысле близкими к исходным, но более простыми) криволинейной формы через использование не изогнутых элементов.

Диагонально-сетчатые несущие конструкции позволяют использовать двойное остекление. Внешнее остекление – стеклопакеты. Состоит из стоек и окон треугольной формы. Внутренняя стенка изготовлена из раздвижных стеклянных дверей, для удобства обслуживания. Между двумя стенами оставлено пространство и установлен ряд горизонтальных солнцезащитных устройств. В треугольный фасад встроены вентиляционные клапаны (см. рисунок 8). За счет этого обеспечивается полное проветривание здания [10].

5. Заключение

Таким образом, в результате проделанного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Диагонально-сетчатые несущие конструкции обладают гораздо более выгодной архитектурной выразительностью и позволяют формировать уникальные по своей геометрии и архитектурному облику здания и сооружения;

2. Конструктивные особенности диагонально-сетчатых несущих конструкций значительно превосходят аналогичные у традиционных строительных конструкций;

3. Сравнительная новизна данного типа конструкций требует более комплексного подхода к изучению особенностей применения диагонально-сетчатых конструкций в отечественных проектно-исследовательских работах.

Литература

1. Graefe R., Suchov V. G. (1990). 1853—1939. Die Kunst der sparsamen Konstruktion. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1990. 192 p. (ger)
2. Moon K., Jerome J. Connor, John E. Fernandez (2007). 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.
3. Khushbu Jani, Paresh V. Patel (2013). Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings. Procedia Engineering. Vol. 51. 2013. Pp. 92-100.
4. Boake T.M. (2014). Diagrid Structures: Innovation and Detailing // School of Architecture, University of Waterloo, Canada. 2014. 8 p.
5. Grefe R., Perchi O., Shukhov F. V., Gappoyev M.M. "Shukhov (1853-1939). Art of design". M., 1994. 192 p.
6. Филд. А. Новый Лондонский король // АВОК. 2004. №2. 2004. 6 с.
7. Moon K. (2009). Design and Construction of Steel Diagrid Structures. School of Architecture. Yale University. New Haven. USA. 2009. Pp. 398-405.
8. Moon K., Connor, J. J. & Fernandez, J. E. (2009). Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design. The Structural Design of Tall and Special Buildings. Vol. 16.2. Pp. 205-223.
9. Ali, M. M. & Moon, K. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. Architectural Science Review. Vol. 50.3. 205-223 p.
10. Moon K. (2005) Dynamic interrelationship between technology and architecture in tall buildings // Massachusetts Institute of Technology. 2005. Pp. 225-229
11. Диденко В. Г. Высотное строительство: проблемы и перспективы // Социология города. 2008. № 1. Pp. 73-78. (rus)
12. Mousavi F. (2012). 30 St. Mary Axe. Harvard Design Magazine 35. 2012. Pp. 54-59.
13. Потапова Ю. И. Высотное строительство в России – проблемы, задачи и способы их решения // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 14-16. (rus)
14. Connor J. (2003). Introduction to Structural Motion Control. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ. 2003. 272 p.
15. Boake T. (2011). Understanding Steel Design: An Architectural Design Manual. Canada. 2011. 18 p.
16. Boake T. (2012). CISC Guide for Specifying Architecturally Exposed Structural Steel. Canada. 2012. 26 p.
17. Barry C., McDonnell T. (2008). The Bow: Unique Diagrid Structural System for a Sustainable Tall Building. 2008. 5 p.
18. Mele E., M. Toreno, G. Brandonisio & A. De Luca (2014). Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. 2012. Pp. 124-145.
19. Moon K. (2009). Design and Construction of Steel Diagrids. NSCC2009. 2009. Pp. 398-405.
20. Moon K. (2011). Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. Procedia Engineering 14. Pp. 1343-1350.
21. Moon K. (2008). Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. Architectural Science Review 51. Pp. 239-251.
22. Moon K. (2011). Sustainable Design of Braced Tube Structures: The Role of Geometric Configuration. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development 2. Pp. 229-236.
23. In Yong Jung, Young Ju Kim, Young K. Ju, Sang Dae Kim, Sung Jig Kim (2014). Experimental investigation of web-continuous diagrid nodes under cyclic load. Engineering Structures, Volume 69. 15 June 2014. Pp. 90-101.
24. Giovanni Maria Montuori, Elena Mele, Giuseppe Brandonisio, Antonello De Luca (2014). Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. Engineering Structures. Volume 71. 15 July 2014. Pp. 112-127.
25. Dongkyu Lee, Soomi Shin (2014). Advanced high strength steel tube diagrid using TRIZ and nonlinear pushover analysis. Journal of Constructional Steel Research. Volume 96. May 2014. Pp. 151-158.
26. Young-Ju Kim, Myeong-Han Kim, In-Yong Jung, Young K. Ju, Sang-Dae Kim (2011). Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures // Engineering Structures. Volume 33. Issue 7. July 2011. Pp. 2134-2144.

27. 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. Volume 13. Supplement 1. October 2008. Pp. 108-113.
28. Ali M., Moon K. (2007) Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. Architectural Science Review 50. Pp. 205-223.
29. Subramonian N., Subramanian G. (1970). Lateral buckling of a simply supported uniform diagrid. International Journal of Mechanical Sciences. Volume 12. Issue 1. January 1970. Pp. 35-38.
30. Binh K. Nguyen, Altan H. (2008). 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.
31. Nishith B. Panchal, Vinubhai R. Patel (2014). Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. Pp. 374-378.

Diagrid structural systems for tall buildings

O.V. Iakuba¹, A.V. Bardin²

^{1,2}*Saint-Petersburg Polytechnical University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia*

ARTICLE INFO

Technical paper

Article history

Received 11 June 2014
Accepted 10 July 2014

Keywords

diagrid structural systems for tall buildings,
supporting steel shell,
diagonal grid,
triangulated steel mesh,
tall buildings.

ABSTRACT



This article discusses the use of diagonal mesh support structure on the example of a high-rise building. High-rise buildings are the difficult construction object representing unique constructions which have height over 100 meters.

One of the most dangerous factors influencing high-rise buildings is the wind which can to break integrity of protecting designs and to lead to impossibility to operate the building. Also at design of high-rise buildings is necessary to consider seismic stability of a construction and pressure which puts upon soil. As well as any unique construction the high-rise building is very expensive construction object including besides project and construction works as well scientific researches. Therefore, at design always try to reduce the cost of construction by application of the advanced construction technologies.

Diagonal and mesh bearing designs - "Diagrid" belong to one of front lines and construction technologies gathering popularity.

¹ *Corresponding author:*
+7 (911) 903 8822, yakuba.olka@gmail.com (Olga Vyacheslavovna Iakuba, B.Sc.)
² +7 (931) 354 6847, kmkbav@gmail.com (Aleksey Vladimirovich Bardin, B.Sc.)

References

1. Graefe R., Suchov V. G. (1990). 1853—1939. Die Kunst der sparsamen Konstruktion. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1990. 192 p. (ger)
2. Moon K., Jerome J. Connor, John E. Fernandez (2007). 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.
3. Khushbu Jani, Pares V. Patel (2013). Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings. *Procedia Engineering*. Vol. 51. 2013. Pp. 92-100.
4. Boake T.M. (2014). Diagrid Structures: Innovation and Detailing // School of Architecture, University of Waterloo, Canada. 2014. 8 p.
5. Grefe R., Perchi O., Shukhov F. V., Gappoyev M.M. "Shukhov (1853-1939). Art of design". M., 1994. 192 p.
6. Field A. "Novyy londonskiy korol" ["New London King"]. AVOK. Issue 2, *Energoeffektivnyye zdaniya. Tekhnologii*. 2004. 6 p. (rus)
7. Moon K. (2009). Design and Construction of Steel Diagrid Structures. School of Architecture. Yale University. New Haven. USA. 2009. Pp. 398-405.
8. Moon K., Connor, J. J. & Fernandez, J. E. (2009). Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. Vol. 16.2. Pp. 205-223.
9. Ali, M. M. & Moon, K. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*. Vol. 50.3. 205-223 p.
10. Moon K. (2005) Dynamic interrelationship between technology and architecture in tall buildings // Massachusetts Institute of Technology. 2005. Pp. 225-229
11. Didenko V.G. (2008) *Vysotnoye stroitelstvo: problemy i perspektivy* [High rise construction: Problems and Prospects]. *Sotsiologiya goroda*. 2008. Issue 1. Pp. 73-78. (rus)
12. Mousavi F. (2012). 30 St. Mary Axe. *Harvard Design Magazine* 35. 2012. Pp. 54-59.
13. Potapova Yu. I. (2012). *Vysotnoye stroitelstvo v Rossii – problemy, zadachi i sposoby ikh resheniya* [High rise construction in Russia - achievements, problems and their solutions]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2012. Issue 6. Pp. 14-16. (rus)
14. Connor J. (2003). Introduction to Structural Motion Control. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ. 2003. 272 p.
15. Boake T. (2011). Understanding Steel Design: An Architectural Design Manual. Canada. 2011. 18 p.
16. Boake T. (2012). CISC Guide for Specifying Architecturally Exposed Structural Steel. Canada. 2012. 26 p.
17. Barry C., McDonnell T. (2008). The Bow: Unique Diagrid Structural System for a Sustainable Tall Building. 2008. 5 p.
18. Mele E., M. Toreno, G. Brandonisio & A. De Luca (2014). Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. 2012. Pp. 124-145.
19. Moon K. (2009). Design and Construction of Steel Diagrids. NSCC2009. 2009. Pp. 398-405.
20. Moon K. (2011). Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. *Procedia Engineering* 14. Pp. 1343-1350.
21. Moon K. (2008). Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. *Architectural Science Review* 51. Pp. 239-251.
22. Moon K. (2011). Sustainable Design of Braced Tube Structures: The Role of Geometric Configuration. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* 2. Pp. 229-236.
23. In Yong Jung, Young Ju Kim, Young K. Ju, Sang Dae Kim, Sung Jig Kim (2014). Experimental investigation of web-continuous diagrid nodes under cyclic load. *Engineering Structures*, Volume 69. 15 June 2014. Pp. 90-101.
24. Giovanni Maria Montuori, Elena Mele, Giuseppe Brandonisio, Antonello De Luca (2014). Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*. Volume 71. 15 July 2014. Pp. 112-127.
25. Dongkyu Lee, Soomi Shin (2014). Advanced high strength steel tube diagrid using TRIZ and nonlinear pushover analysis. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 96. May 2014. Pp. 151-158.

26. Young-Ju Kim, Myeong-Han Kim, In-Yong Jung, Young K. Ju, Sang-Dae Kim (2011). Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures // *Engineering Structures*. Volume 33. Issue 7. July 2011. Pp. 2134-2144.
27. 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*. Volume 13. Supplement 1. October 2008. Pp. 108-113.
28. Ali M., Moon K. (2007) Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. *Architectural Science Review* 50. Pp. 205-223.
29. Subramonian N., Subramanian G. (1970). Lateral buckling of a simply supported uniform diagrid. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 12. Issue 1. January 1970. Pp. 35-38.
30. Binh K. Nguyen, Altan H. (2008). 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.
31. Nishith B. Panchal, Vinubhai R. Patel (2014). Diagrid structural system: Strategies to reduce lateral forces on high-rise buildings. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. Pp. 374-378.