

Обзор сетчатой несущей конструкции - системы Diagrid.

В.А. Космодемьянов, А.А. Родимов

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье представлен краткий обзор создания системы Diagrid, описана концепция формирования данной структуры, её ключевые элементы и их роль для создания геометрически неизменяемых целостных конструкций. Приведены основные направления применения в строительстве и особенности работы при вертикальных и горизонтальных силовых воздействиях. Также приведен обзор используемых материалов конструкций и основных ограничений при проектировании. Данная статья будет полезна инженерам-конструкторам и архитекторам, занимающимся проектированием и расчетом высотных зданий, а также зданий со сложной архитектурной формой из железобетонных и металлических конструкций.

Ключевые слова: diagrid, сетчатая несущая конструкций, железобетонная конструкция, металлические конструкции, устойчивость, свободная архитектурная форма.

Современные тенденции в строительстве, поиск новых архитектурных форм и обликов зданий, увеличение высотности зданий и сооружений, а также освоение территорий с сейсмической опасностью наталкивают на поиск более легких, но в тоже время устойчивых к вертикальным и горизонтальным нагрузкам строительных систем. Такой системой является Diagrid, чье название образовано от сочетания двух английских слов diamond grid из-за внешнего облика, который напоминает рисунок решетки этого драгоценного камня. Данная система сочетает в себе необычный архитектурный облик здания, устойчивость и прочность.

В исследовании [1] указывается, что начало развития данной системы относится к Всероссийской промышленной и художественной выставке в 1896 г. Несущие конструкции покрытия павильонов и часть экспозиции данной выставки были выполнены по проекту знаменитого русского инженера Владимира Григорьевича Шухова, здесь же была представлена конструкция новейшего типа – знаменитая сетчатая гиперболоидная водонапорная башня.

Данная башня по сей день функционирует в селе Полибино. Фотография башни представлена на рис.1.



Рис. 1. – Первая в мире водонапорная башня с несущей конструкцией в виде сетчатого гиперboloида, представленная на Всероссийской выставке 1896 г., настоящее время.

Следующая знаменитая конструкция, которая вдохновляет на создание подобных конструкций в наше время — это башня Шухова, завершенная в 1922 году. Высота башни - 160 метров, материал элементов – металл. Масса несущих конструкций - 2200 тонн. Данная башня представлена на рис.2.



Рис. 2. – Башня Шухова.

Около сорока лет данная система применялась только для возведения инженерных сооружений в виде опор линий электропередач, водонапорных башен, конструкций покрытия и других сооружений, не имея популярности в гражданском строительстве.

Согласно [2], первым гражданским зданием с применением данной системы является офисное здание компании International Business Machines, IBM (USA, Pittsburgh), завершённое в 1963 г. по проекту компании Leslie E. Robertson. Высота - 58 м, 13 этажей, материал элементов системы – металл. Систему поддерживает фасад и внешний контур плит перекрытия, и она имеет всего 8 точек опоры. 1 ромб соответствует одному этажу здания. Данное здание представлено на рис.3.

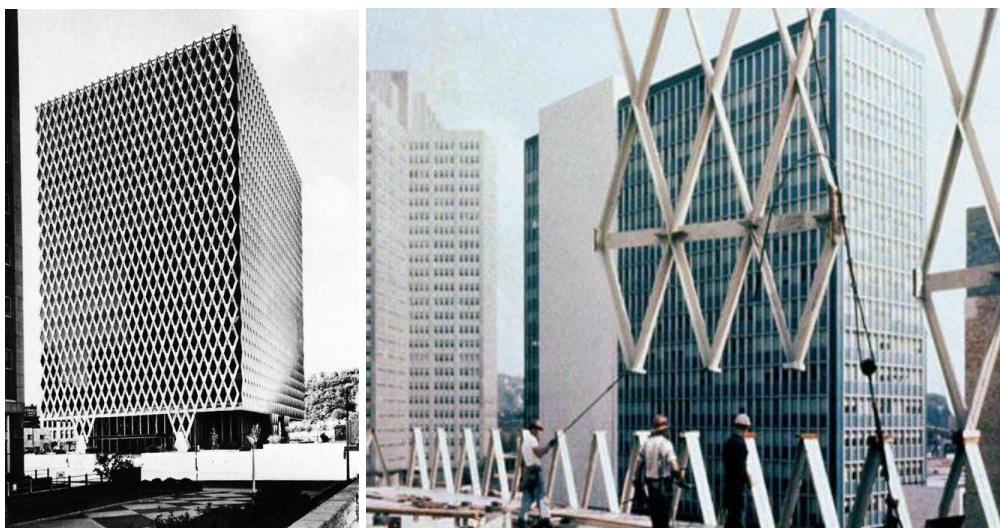


Рис. 3. – Офисное здание компании IBM. Слева представлено здание в завершённом виде, справа - во время строительства [3].

Во время строительства использовались три класса закалённой стали и для маркировки применяли различный окрас элементов системы. На рис.4 показана цветовая маркировка во время строительства офисного здания компании IBM.

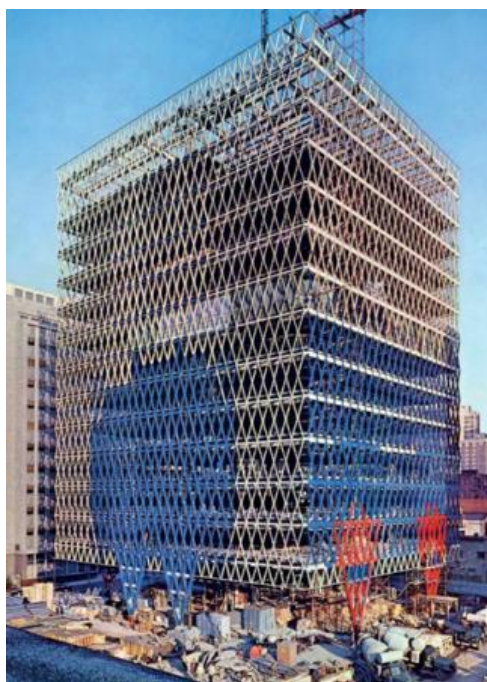


Рис. 4. – Цветовая маркировка во время строительства офисного здания компании IBM [4].

Судя по исследованию, приведённому в пункте [2], в последующие годы данная система не вызывала большого интереса, но, начиная с 2000-х годов, в области гражданского строительства вновь наблюдается значительный интерес к данной системе и количество зданий с её применением неуклонно растёт. Одним из самых характерных зданий современности является здание Swiss Re, построенное в 2003 г. по проекту фирмы Foster + Partners. Высота – 180 м, 40 этажей, материал элементов системы – металл. Автор проекта говорил, что в качестве основной идеи использовал башню Шухова. Здание Swiss Re представлено на рис.5.



Рис. 5. – Здание Swiss Re. Слева готовое здание, справа - оно же во время строительства [3].

В приведённых выше примерах представлены здания, несущие элементы которых выполнены из металла, но есть примеры с применением железобетонных конструкций. На рис.6 представлено здание Poly Real Estate Head-quarters, по проекту фирмы Skidmore, Owings and Merrill (SOM), построенное в 2007 г. Высота здания – 150 м, 34 этажа, материал элементов системы – железобетон [2,3].



Рис. 6. – Poly Real Estate Head-quarters – здание с элементами Diagrid, выполненными из железобетона.

Интерес к данной системе имеет следующие основания:

1. Все элементы данной системы включены в работу конструкций как с действием вертикальной нагрузки, так и с действием горизонтальной нагрузки, что в некоторых случаях позволяет вообще отказаться от массивных ядер жесткости и дополнительных вертикальных диафрагм.
2. Данная система позволяет создавать разнообразные архитектурные формы, придает необычный внешний облик за счет своей сетки, а также позволяет формировать свободные пространства внутренних помещений без ущерба для механической безопасности. На рис.7 приведены примеры внутренних пространств.



Рис. 7. – Примеры внутренних пространств с наружной и внутренней системой Diagrid.

3. Эффективность работы конструкции создаётся за счет конструкций узлов и того, что основная часть нагрузки передается через узлы между этажами, даже при сложной форме здания с большими эксцентриситетами. Элементы работают в основном только на сжатие и растяжение. На рис.8 представлено здание Capital Gate с криволинейной формой, построенное в 2011 году. Высота здания – 160 м, 35 этажей, материал элементов – металл [4].



Рис. 8. – Пример криволинейной архитектурной формы с системой Diagrid.

Концепция несущей системы Diagrid представляет собой внешнюю сетчатую систему Diagrid, связанную с внутренними несущими конструкциями горизонтальной диафрагмой. Внутренние конструкции также могут выполняться в виде системы Diagrid.

Для устойчивости системы также необходима кольцевая балка (затяжка) в виде горизонтального стержня на уровне узлов соединения элементов, она необходима для восприятия растягивающих нагрузок. Обычно данная балка продлевается до консольных углов перекрытия для повышения его жесткости. Концепция, основные элементы системы Diagrid и их назначение представлены на рис.9.

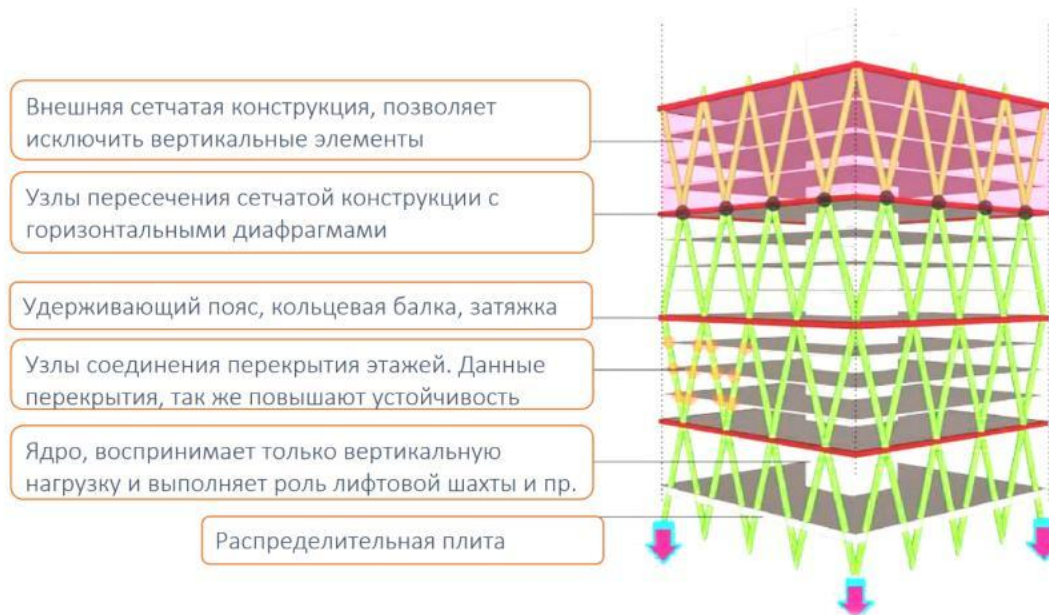


Рис. 9. – Концепция системы Diagrid, основные элементы и их назначение.

Целесообразность применения тех или иных материалов в первую очередь определяется нормами, регулирующими строительную отрасль. Одно из основных ограничений - это требование по огнестойкости, так как в основном данная система используется для высотных зданий, при проектировании которых к огнестойкости конструкций предъявляются высокие требования. Также играет роль форма здания, из-за которой часть элементов будет работать на значительные растягивающие нагрузки, район строительства по сейсмической активности, где лучше применять материалы с возможностью образования пластических шарниров и способностью поглощать энергию колебаний, и вообще возможность доставки данных материалов в район строительства, наличие техники и квалификации строителей. В связи со всеми этими факторами, наиболее распространены стальные элементы конструкции, так как данный материал одинаково хорошо сопротивляется как сжатию, так и растяжению, а также сталебетон – в связи с устойчивостью к короблению и повышенной прочностью бетона за счет эффекта обжатия [5].

К узлам соединения элементов системы предъявляются повышенные требования на стадии расчета и проектирования и особенно при изготовлении и монтаже, узел системы рассчитывается на осевую передачу усилий от элемента к элементу, но работает при сложном напряженно-деформированном состоянии с зонами пластических деформаций и небольшие отклонения на одной из стадий могут привести к тому, что в элементах будут возникать изгибающие моменты, на которые элементы конструкции не рассчитаны – ведь основная идея в том, чтобы в элементах возникали только осевые нагрузки. При этом, узлы проектируются жесткими для обеспечения надёжной фиксации во время монтажа [6-7]. Это увеличивает темпы строительства и позволяет выполнять сложные, требующие высокой точности, работы в специально оборудованных цехах. На рис.10 представлен один из характерных узлов.



Рис. 10. – Типовой узел здания Swiss Re

Конструкция данного узла представлена:

- Толстыми металлическими соединительными пластинами для равномерного распределения напряжений
- Болтовыми соединениями для плотного прилегания по всей площади и точности монтажа
- Специальными подрезками на основной пластине для уменьшения влияния момента

Основным параметром, определяющим внешний облик здания, расход материала, жесткость здания и напряженно-деформированное состояние конструкции, является угол наклона элементов системы.

Угол наклона – это угол между горизонталью перекрытия и элементом системы. На рис.11 приведено графическое представление угла наклона.

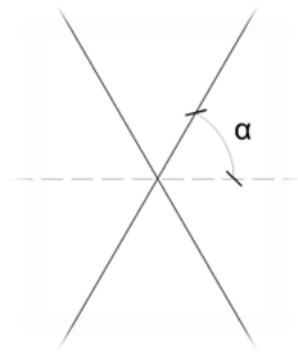


Рис. 11. – Графическое представление угла наклона элементов Diagrid

Данный угол может быть регулярным по всей высоте здания или быть переменным, уменьшаясь от основания до верхнего этажа здания. Исследование влияния углов наклона, воспроизведение зарубежного опыта на отечественном программном обеспечении авторы статьи приведут в последующих публикациях.

Идея системы Diagrid не нова, но на данный момент, после достаточно длительной паузы получила широкое развитие в области гражданского строительства, особенно при строительстве общественных, высотных зданий, давая возможность архитекторам создавать свободные архитектурные формы без ущерба механической безопасности здания.

Наличие большого количества избыточных связей делают данную систему устойчивой к прогрессирующему обрушению и сейсмическим воздействиям, так как даже при исключении из работы нескольких элементов, напряженно-деформированное состояние остается преимущественно одноосным [8-10].

Данная система требует высокого уровня проработки проекта, это достаточно трудоемкий, итерационный процесс, требующий увязки архитектурного облика здания с видом принятой сетки, от которой зависит надежность здания.

Также требуется высокий уровень автоматизации и высокоточное оборудование для изготовления узлов и элементов, совершенствование норм и методов расчета строительных конструкций.

Литература

1. Петренко Ф.И., Расчет сетчатых оболочек отрицательной гауссовской кривизны с учетом геометрической и физической нелинейности М.: дис. ... канд. техн. наук, 2017 г. - 188с.

2. 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, 2014. URL: doi:10.4172/2168-9717.1000121
3. Воаке Т.М. Diagrid structures system / connections / details, 2014. - 184 p.
4. Анохин Н.Н. Строительная механика в примерах и задачах. Часть 1. 4-е изд. М: Издательство АСВ, 2016 - с.7-90
5. Srisangeerthan S., Hashemi M.J., Rajeev P., et al., Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings. *Build J.*, 2020 г. – 28 p.
6. Воаке Т.М., 2016. The emergence of the Diagrid - IT's all about the node. *International journal of high-rise Buildings*, 2016. – pp. 293-304
7. Трастьян Н.А., Линьков Н.В. Разработка рамных узлов стальных конструкций с учетом пластических деформаций // *Инженерный вестник Дона*, 2019, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_Trastyan_Linkov.pdf_bf20a01bfe.pdf
8. Moon K.-S., *et al.* Diagrid structural systems for tall buildings: characteristics and methodology for preliminary design *Struct. Des. Tall Special Build.* 2007. – pp.205-230.
9. Jinkoo Kim, Young-Ho Lee. Seismic Performance Evaluation of Diagrid System Buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2012. URL: 10.1002/tal.643.
10. Бесалаев Н.А. Проектирование многоэтажных зданий с металлическим каркасом для повышения их сопротивления прогрессирующему обрушению // *Инженерный вестник Дона*, 2018, №4/ URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5316.

References

1. Petrenko F.I. Raschet setchatyh obolochek otricatel'noj gaussovskoj krivizny s uchetom geometricheskoj i fizicheskoj nelinejnosti [Calculation of mesh shells of negative Gaussian curvature taking into account geometric and physical nonlinearity] М.: дис. ... kand. teh. nauk, Moskva, 2017. 188 p
 2. 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, 2014. URL: doi:10.4172/2168-9717.1000121
 3. Воаке Т.М. Diagrid structures system / connections / details, 2014, 184 p.
-



4. Anohin N.N. Stroitel'naja mehanika v primerah i zadachah. Chast' 1 [Construction mechanics in examples and problems Part 1]. 4-e izd. M: Izdatel'stvo ASV 2016, pp. 7-90.
5. Srisangeerthan S., Hashemi M.J., Rajeev P., et al., Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings. Build J., 2020, 28 p.
6. Boake T.M., 2016. International journal of high-rise Buildings, pp. 293-304.
7. Trast'jan N.A., Lin'kov N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_Trastyan_Linkov.pdf_bf20a01bfe.pdf
8. Moon K.-S., *et al.* Des. Tall Special Build. 2007, pp. 205-230.
9. Jinkoo Kim, Young-Ho Lee. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012. URL: 10.1002/tal.643.
10. Besalaev N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5316.