

Опыт моделирования несущей конструкции – системы Diagrid

В.А. Космодемьянов, А.А. Родимов

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье воспроизведен и дополнен опыт моделирования и определения оптимального угла наклона решетки с оценкой суммарных длин элементов, наибольших усилий, перемещений и собственных частот для компьютерных моделей различных конфигураций. Описана возможность использования данной системы в гражданском строительстве при применении объемно-блочной технологии возведения зданий. Данная статья будет полезна инженерам-конструкторам, занимающимся проектированием и расчетом высотных зданий, объемно-блочных или модульных зданий из железобетонных и металлических конструкций.

Ключевые слова: diagrid, сетчатая несущая конструкция, железобетонная конструкция, металлические конструкции, устойчивость, свободная архитектурная форма, компьютерная модель, высотные здания, объемный-блок, сборный модуль.

Краткая история развития, концепция конструирования и основные элементы данной системы приведены в [1,2]. В данной статье рассматривается несколько вариантов моделей для определения зависимостей между усилиями, наибольшими вертикальными и горизонтальными перемещениями, частотами собственных колебаний и параметрами элементов.

Для исследования влияния угла наклона на характеристики конструкции были рассмотрены следующие углы: 70°, 60°, 50°, 40°.

В качестве исследуемой конструкции был принят каркас неизменного в плане, квадратного очертания, размером 29х29 м, в который должно укладываться целое число панелей системы. Схемы исследуемых конструкций представлены на рис.1.

Для данных схем создавали пространственные расчетные модели в рабочем комплексе ЛИРА-САПР 2016. На рис. 2 показан обобщённый объемный вид одного модуля системы.

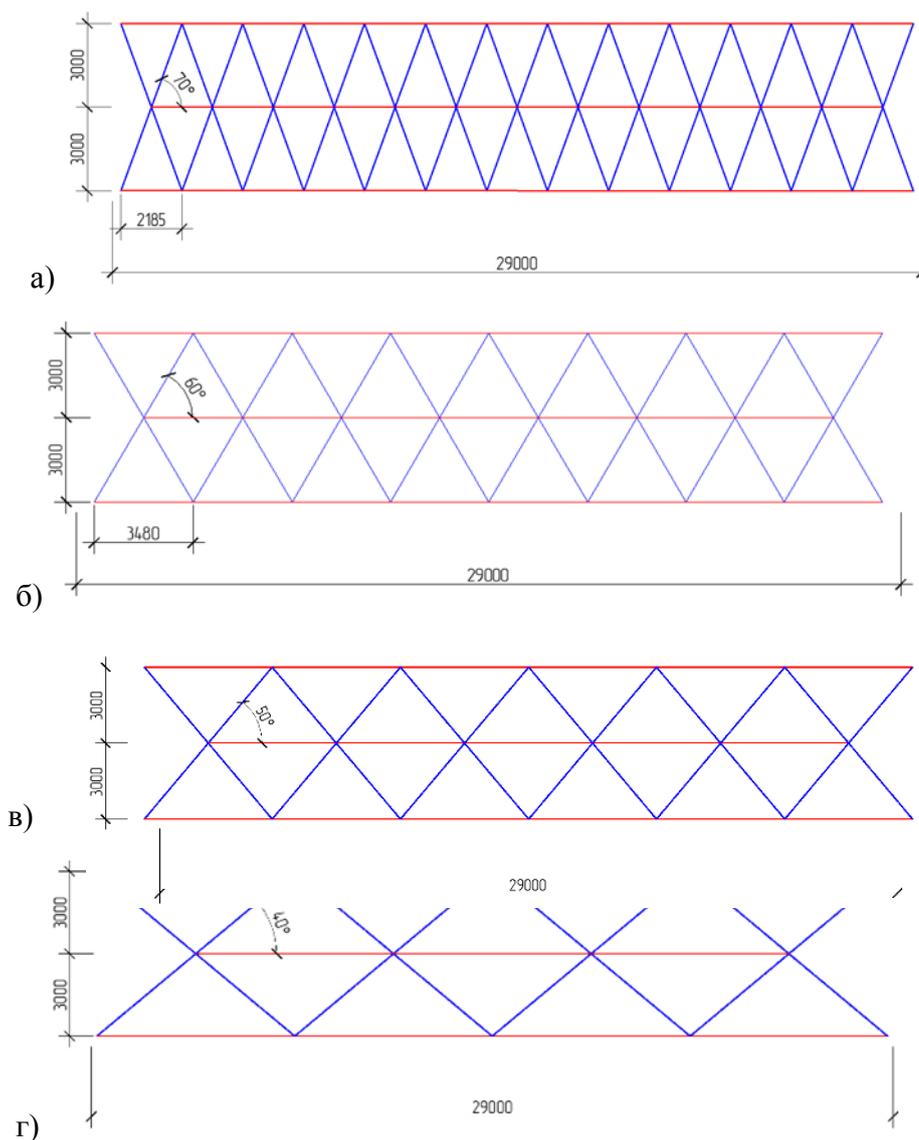


Рис. 1. – Схемы исследуемых конструкций. а) для 70° , б) для 60° , в) для 50° , г) для 40° .

В качестве неизменных для всех схем параметров принято:

- Сечение основного элемента – труба 203x8.
- Кольцевая балка (затяжка) – двутавр 20Б1.
- Модуль упругости $E=2 \times 10^5$ Мпа
- Оценка прочности не проводилась.
- Горизонтальная диафрагма перекрытия – стержни с численным описанием с большой жесткостью на сжатие и очень малой жесткостью на изгиб.

- Узлы сопряжения по умолчанию приняты жесткими.
- Закрепление в уровне фундамента – шарнирное.
- Количество модулей – 20, что соответствует принятой высоте этажа - 120 м.
- Количество этажей - 40.
- Нагрузка принята 104 тонны на 1 этаж, равномерно распределена по всем узлам системы в уровне этажа для исключения появления моментов в узлах согласно [3], данную систему следует проектировать с учетом преобладающей передачи нагрузок через узлы.

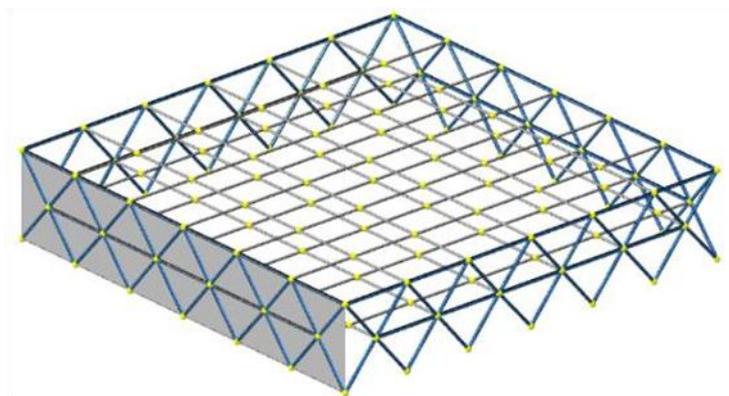


Рис. 2. – Объемный вид обобщённой расчетной схемы в РК ЛИРА-САПР 2016

Для задания ветровой нагрузки были смоделированы пластинчатые конечные элементы (далее КЭ) с очень малой жесткостью. Данные КЭ воспринимают ветровую нагрузку и распределяют её по узлам системы, но не участвуют в работе конструкции. Ветровая нагрузка имеет следующие параметры:

- Ветровая нагрузка задана как для 120 метрового прямоугольного в плане здания с габаритами 29х29 м, тип местности В, ветровой район - 1-ый.
- Пульсационная составляющая на данном этапе исследования не учитывалась

Объемный вид обобщенной пространственной расчетной модели с ветровой нагрузкой представлен на рис.3.

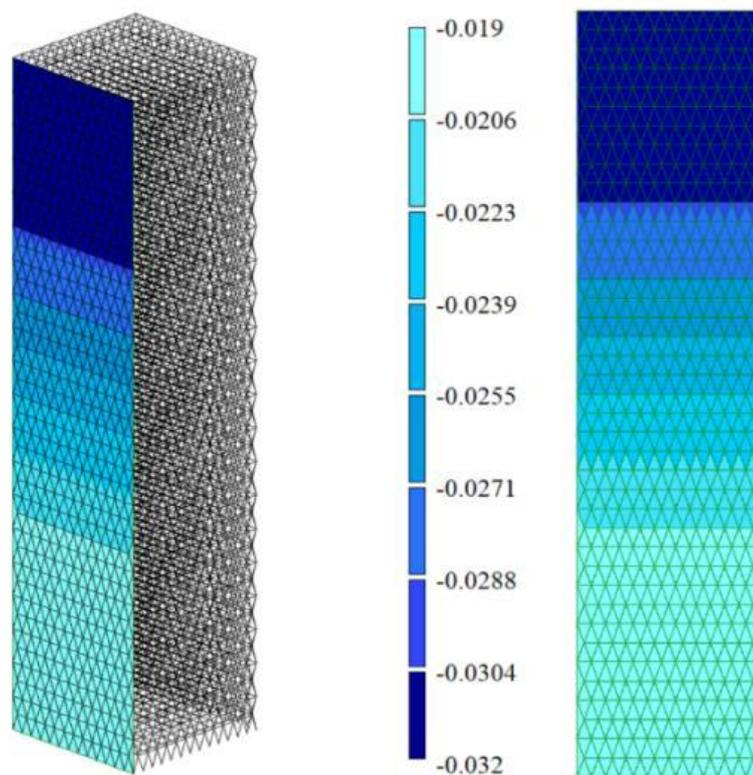


Рис. 3. – Пространственная расчетная модель с ветровой нагрузкой.

Единицы измерения ветрового давления на шкале $[T/m^2]$.

Для оценки влияния угла наклона сравнивали такие показатели, как:

1. Наибольшие продольные усилия - рис.4, а)
2. Наибольшие вертикальные перемещения - рис.4, б)
3. Наибольшие горизонтальные перемещения - рис.4, в)
4. Частота и модальная масса крутильной формы колебаний- рис.4, г)
5. Величины частот собственных колебаний - таблица 1

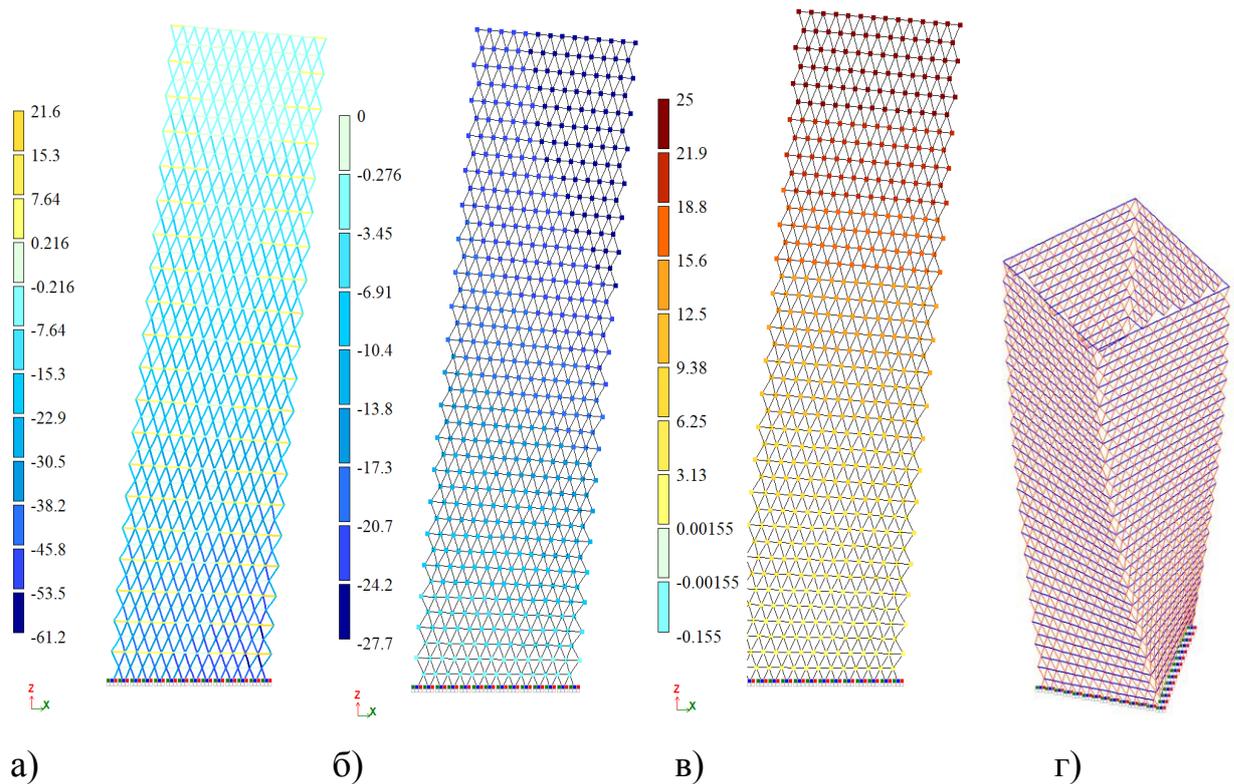


Рис. 4. – Оцениваемые показатели от совместного действия бокового давления ветра и вертикальной нагрузки.

Таблица № 1

Значения частот (периодов) собственных колебаний конструкции

№ формы	Частоты		Период (с)	Мод. масса (%)	Сумма мод. масс (%)
	Круг. Частота (рад/с)	Частота (Гц)			
1	3.531	0.562	1.779	10.660	10.660
2	3.536	0.563	1.777	35.833	46.494
3	7.058	1.123	0.890	0.000	46.494
4	12.241	1.948	0.513	6.225	52.719
5	12.243	1.948	0.513	6.485	59.203
6	21.165	3.369	0.297	0.000	59.203
7	22.050	3.509	0.285	27.392	86.595
8	24.460	3.893	0.257	1.801	88.396
9	24.461	3.893	0.257	1.144	89.540
10	34.798	3.538	0.181	0.544	90.084
11	34.799	3.538	0.181	0.734	90.818

Крутильная форма колебаний соответствует 3-ей собственной частоте, из таблицы № 1 видно, что на 3-ей собственной частоте модальная масса конструкции равна 0, и это означает, что по данной форме конструкция в колебания не вовлекается, уход от крутильных форм колебаний благоприятно влияет на НДС конструкций от динамических воздействий, например, пульсационной составляющей ветровой нагрузки или сейсмического воздействия. Результаты расчетов представлены в таблице № 2.

Таблица № 2

Наименования отслеживаемого параметра	Угол наклона элементов			
	70	60	50	40
Наибольшее усилие в наклонном стержне (сжатие) [Т]	61.2	105	160	319
Наибольшее усилие в элементе пояса (растяжение) [Т]	21.6	43.9	63.1	97.4
Наибольшее вертикальное перемещение [мм]	27.7	60	122	339
Наибольшее горизонтальное перемещение [мм]	25	43	75.5	214
1-ая собственная частота [Гц]	0.562	0.430	0.342	0.198
Крутильная форма колебаний	3	3	3	3
Длина наклонного элемента [м]	6.385	6.93	7.83	9.335
Длина элемента пояса [м]	2.185	3.46	5.035	7.15
Суммарная длина наклонных элементов [м]	13280.8	8870.4	7516.8	5974.4
Суммарная длина элементов пояса [м]	4368	4162.4	4432.8	4004

А также представлены в виде графиков этих параметров в зависимости от угла наклона на рис. 5-9.



Рис. 5. – График изменения N



Рис. 6. – График изменения перемещений

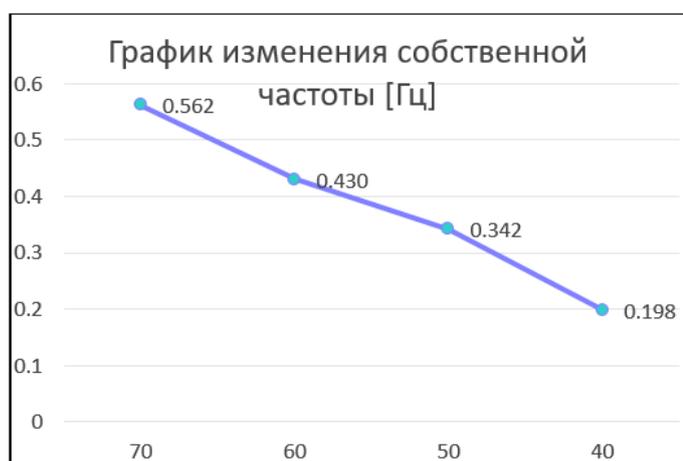


Рис. 7. – График изменения частоты собственных колебаний

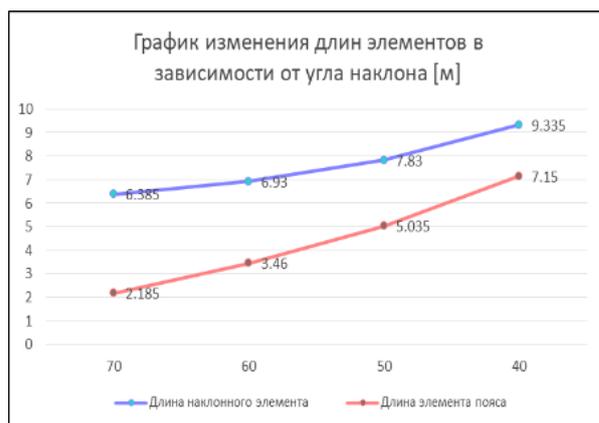


Рис. 8. – Изменение длины элементов длины



Рис. 9. – Изменение суммарной

Из графиков видно, что при угле менее 50 градусов происходит резкое увеличение наибольших усилий в элементах и перемещений, остальные зависимости можно грубо оценить, как линейные.

Повышенная жесткость большего угла наклона объясняется следующими факторами:

1. Большим количеством элементов по сравнению с другими схемами.
2. Уменьшение угла наклона увеличивает растягивающее напряжение в кольцевой балке, особенно сильно сказывается это в основании конструкции. Оценка влияния жесткости кольцевой балки будет приведена в последующих исследованиях.

В результате изучения построенных зданий и опыта моделирования, приведённого выше, ясно, что для решения задачи получения наиболее экономичного варианта по расходу материала, необходимо применять переменный угол наклона. Для оценки была смоделирована конструкция с нерегулярным углом наклона в горизонтальном и вертикальном направлении. Причем рисунок сетки выполнен в соответствии с направлениями главных напряжений. На рис.10 показан фрагмент схемы.

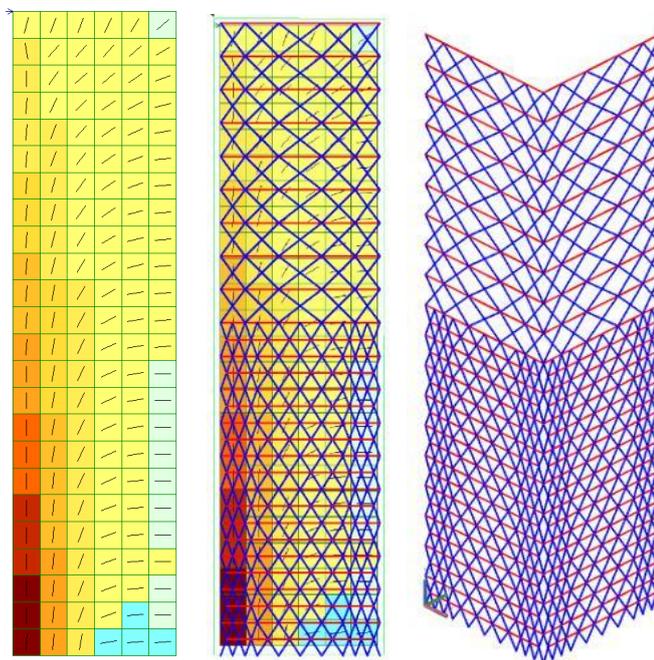


Рис. 10. – Фрагмент схемы с нерегулярным углом наклона

Результаты расчета для переменного шага совместно с регулярным шагом приведены в таблице № 3.

Таким образом, из приведённых выше исследований регулярных углов наклона, самым эффективным с точки зрения усилий и перемещений является угол 70° , что согласуется с другими исследованиями в этом направлении [4-6].

Значительную роль в жесткости конструкции играет кольцевая балка, её роль еще предстоит оценить.

Стержневая система Diagrid обладает высокой жесткостью, что подтверждается достаточно высокой частотой для такой высоты здания, несмотря на то что ни одна модель не содержит вертикальных диафрагм.

Таблица № 3

Наименования отслеживаемого параметра	Угол наклона элементов				
	70	60	50	40	перемен.
Наибольшее усилие в наклонном стержне (сжатие) [Т]	61.20	105.00	160	319	108
Наибольшее усилие в элементе пояса (растяжение) [Т]	21.60	43.9	63.1	97.4	52.5
Наибольшее вертикальное перемещение [мм]	27.70	60	122	339	73.1
Наибольшее горизонтальное перемещение [мм]	25.00	43	75.5	214	34.2
1-ая собственная частота [Гц]	0.562	0.430	0.342	0.198	0.493
Крутильная форма колебаний	3	3	3	3	3
Длина наклонного элемента [м]	6.385	6.93	7.83	9.335	перемен.
Длина элемента пояса [м]	2.185	3.46	5.035	7.15	перемен.
Суммарная длина наклонных элементов [м]	13280.8	8870.4	7516.8	5974.4	8663
Суммарная длина элементов пояса [м]	4368	4162.4	4432.8	4004	3320

Наиболее эффективным, с точки зрения экономии материалов, является переменный шаг, но это величина не абсолютная, так как может увеличить стоимость изготовления и монтажа из-за увеличения типов узлов соединения.

При этом часть элементов системы Diagrid может маскироваться в фасаде, оставляя на виду только составляющую облик здания сетку, как у здания Dorobanti Tower, построенного по проекту Zaha Haddid (Высота - 200м, количество этажей – 57, материал – сталебетон), представленного на рис. 11.

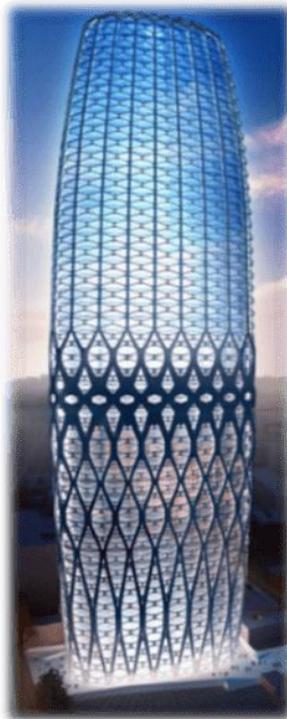


Рис. 11. – Dorobanti Tower

Данная система чаще всего выполняется сборной, что соответствует потребности в уменьшении сроков возведения зданий и скорость монтажа данной системы может соответствовать скорости возведения объемно-блочных зданий из металлических конструкций, а, следовательно, может использоваться совместно, к тому же, если применять данную систему только для восприятия горизонтальной нагрузки, её можно проектировать в составе боковых стен определённых модулей, формируя таким образом вертикальные диафрагмы, решив одну из проблем объемноблочного строительства из металлических конструкций – недостаточной жесткости в плане, представленной на рис. 12.

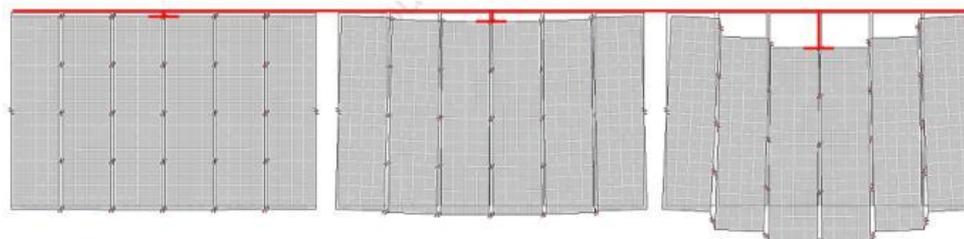


Рис. 12. – Иллюстрация проблемы недостаточности жесткости в плане для модульного строительства при отсутствии промежуточных диафрагм.

Система Diagrid может быть использована при реконструкции и усилении конструкций, так как позволяет при помощи домкратов и затяжек замыкать системы с шарнирами, наводя преднатяжение и включаясь в работу всего каркаса, что будет представлено в последующих публикациях авторов.

За счет большой статической неопределимости благодаря конструкции узлов и «архитектуре сетки» [7,8], система Diagrid обладает хорошей устойчивостью к прогрессирующему обрушению, а за счет своей «архитектуры сетки» и хорошей распределительной способности усилий между элементами конструкций, повышает механическую безопасность зданий, в том числе и в сейсмоопасных районах [9, 10].

Идея системы Diagrid не нова, но на данный момент получила широкое развитие в области гражданского строительства, особенно для строительства общественных зданий. Данная система требует высокого уровня проработки проекта, а это достаточно сложный процесс, требующий увязки архитектурного облика здания и механической безопасности. Также необходим высокий уровень автоматизации и высокоточное оборудование для изготовления узлов и элементов, и развитие норм и совершенствование 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: [researchgate.net/profile/Sepideh-Korsavi/publication/270524390](https://www.researchgate.net/profile/Sepideh-Korsavi/publication/270524390)
3. Анохин Н.Н. Строительная механика в примерах и задачах. Часть 1. 4-е изд. М: Издательство АСВ, 2016 - 335 с.
4. 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.
5. Boake T.M. Diagrid structures system, connections, details, 2014. - 184 p.

6. Boake T.M., 2016. The emergence of the Diagrid. - IT's all about the node. International journal of high-rise Buildings, 2016 г. - 293-304 p.
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. 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.
9. Kyoung-Sun Moon., et al. Diagrid structural systems for tall buildings: characteristics and methodology for preliminary design Struct. Des. Tall Special Build. pp.205-230. URL: ufjf.br/pauvi/files/2019/03/diagrid-caracter%C3%ADstica-e-metodologia.pdf
10. Jinkoo Kim, Young-Ho Lee. Seismic Performance Evaluation of Diagrid System Buildings. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012. URL: shb.skku.edu/_res/hibs/etc/61.pdf.

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] M.: dis. ... kand. teh. nauk, Moskva, 2017. 188 p.
 2. Korsavi S., Maqhareh M.R., J Archit Eng Tech 3, 2014. URL: www.researchgate.net/profile/Sepideh-Korsavi/publication/270524390
 3. Anohin N.N. Stroitel'naja mehanika v primerah i zadachah. Chast' 1 [Construction mechanics in examples and problems Part 1]. 4 izd. M: Izdatel'stvo ASV 2016. 335 p.
 4. 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.
 5. Boake T.M. Diagrid structures system / connections / details, 2014. 184 p.
 6. Boake T.M., International journal of high-rise Buildings, 2016. 293-304 p.
 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. Besalaev N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5316.
-



9. Moon K.-S., et al. Tall Special Build. 2007. pp.205-230. URL: ufjf.br/pauvi/files/2019/03/diagrid-caracter%C3%ADstica-emetodologia.pdf
10. Jinkoo Kim, Young-Ho Lee. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012. URL: shb.skku.edu/_res/hibs/etc/61.pdf.