

Металлоемкость структурной плиты покрытия при различных условиях опирания

А.А. Василькин, Г.В. Зубков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Структурные плиты широко применяются в виде покрытия большепролетных общественных и промышленных зданий и позволяют добиться широкого разнообразия конструктивных и архитектурных форм. В статье поставлена и решена задача поиска конструкции структурной плиты покрытия минимальной массы при заданных классе стали, типе сечения элемента, условиях нагружения. В качестве изменяемого параметра рассмотрено расположение опор. Всего было исследовано 10 вариантов расположения опор для структурной плиты размером 24×24 м и 7 вариантов для структурной плиты размером 30×30 м. После приложения нагрузки, определялось НДС конструкции численным методом, подбиралось сечение и подсчитывалась масса. Затем проводилось сравнение различных вариантов опирания по массе конструкции. Фактически в статье решалась оптимизационная задача по критерию оптимальности металлоемкость, ограничениями в виде габаритных размеров, топологии и прочностных условий.

Ключевые слова: структурная плита, оптимизация, металлоемкость, параметр регулирования.

Структурными плитами называют пространственные стержневые конструкции, с мультиплицированием фигуры определенной формы, так называемого кристалла. Плиты применяют для перекрытия пролетов в общественных и промышленных зданиях: выставочных павильонах, аэропортах, музеях, рынках, гаражах, складах и т.д. [1,2] и они характеризуются такими достоинствами, как высокая архитектурная выразительность и визуальная пластичность [3].

По сравнению с плоскими конструкциями, пространственные структурные плиты обладают следующими преимуществами [4-6].

– более равномерное, по сравнению с традиционными конструкциями, распределение напряжений от сосредоточенных нагрузок, приводящее к более полному использованию несущей способности элементов конструкции и к более эффективному использованию материала;

- высокая надежность, вследствие которой отказ одного или даже нескольких элементов структурной плиты не приводит к разрушению конструкции;
- удобство устройства инженерных сетей и возможность установки производственного оборудования внутри структурных плит;
- простота транспортировки элементов конструкции, особенно в случае необходимости перекрытия больших пролетов;
- большая степень свободы в выборе местонахождения опор.

На первых этапах проектирования перед инженером встает важная задача выбора объемно-планировочного и конструктивного решения структурной плиты. Проектные варианты конструктивного решения могут значительно отличаться друг от друга топологией и различным значением ряда параметров. Окончательный вариант сооружения является, как правило, наиболее эффективным или оптимальным по принятому критерию оптимальности. Применительно к структурным плитам в качестве переменных параметров могут рассматриваться изменение условий опирания, высоты плиты и размера ячейки. Влияние на НДС конструкции высоты плиты и размера ячейки, а также вертикального перекоса опорных узлов рассмотрены в работах [7,8]. Влияние расположения опор по периметру здания изучено рассмотрено в статье [9].

Постановка задачи

В настоящем исследовании определяется металлоемкость пространственной стержневой конструкции, что позволит принять оптимальный вариант проектного решения. Минимальная масса как критерий оптимальности является для строительных конструкций наиболее распространенным, поскольку легко формализуется [10].

Данная задача решается путем определения сечений несущих элементов от действующих нагрузок, в зависимости от расположения колонн внутри периметра структурной плиты.

Для исследования были приняты структурные плиты с размерами в плане 24×24 м и 30×30 м (рис.1), имеющие ортогональную сетку поясов с ячейкой $3,0 \times 3,0$ м и высоту по осям поясов 2,12 м. Кристаллы структурной плиты имеют форму пирамиды с квадратным основанием. Влияние веса колонн на металлоемкость не учитывалось, поскольку их масса, в зависимости от высоты, составляет от 2 до 5% массы всей конструкции, и зависит от назначения объекта проектирования (по данным Серии 1.466-2 Пространственные решетчатые конструкции из труб типа “Кисловодск”). Работа колонн моделировалась в виде отпора, то есть накладывался запрет перемещений вдоль оси Z .

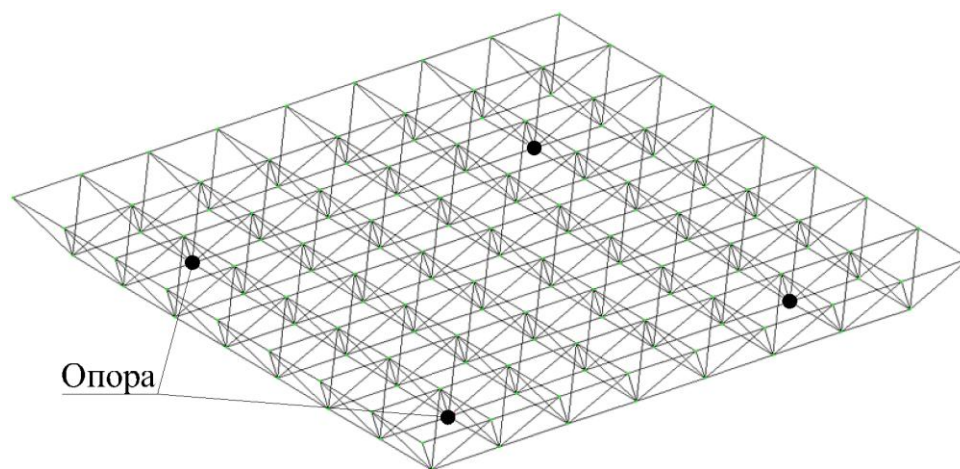


Рис. 1 – Геометрическая схема структурной плиты 24×24 м

Сопряжение элементов в узлах принято шарнирное, сечения элементов из трубы стальной бесшовной горячекатаной по ГОСТ 8732-78. Действующая нагрузка, тип кристалла, высота плиты приняты в качестве неизменяемых параметров. При проведении исследования было принято решение ограничить количество опор, приняв его равным четырем, и в дальнейшем изменять только их расположение. Для расчета конструкции

использовался расчетный комплекс ЛИРА САПР 2016, основанный на методе конечных элементов.

В качестве действующих нагрузок принимались следующие:

1. Постоянная нагрузка – собственный вес структуры, который задавался автоматически ПК ЛИРА САПР 2016 и изменялся на каждой итерации подбора сечений элементов.

2. Снеговая нагрузка - 2,8 кН/м². Поскольку уклон верхнего пояса структуры $\alpha < 30^\circ$, то по СП 20.1330.2016 принято равномерное распределение снегового покрова по всему покрытию.

3. Ветровую нагрузку было решено не учитывать, так как исследования [11] показывают, что доля влияния усилий от ветровой нагрузки на формирование НДС структурных плит составляет около 1%.

В расчетной схеме распределенная нагрузка от покрытия и снега прикладывалась на все элементы верхнего пояса структурной плиты в виде равномерно распределенной нагрузки, что соответствует беспрогонному типу покрытия.

Для проведения расчета была создана пространственная модель структурной плиты с шестью степенями свободы в каждом узле. Тип всех элементов конструкции был задан как ферменный, то есть в расчете использовались только осевые усилия (N). Предельная гибкость элементов структуры – $180-60\alpha$.

Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции был произведен статический расчет. При подборе и проверке сечений сжатых элементов использовался расчет на устойчивость, растянутых элементов – расчет на прочность. Также при расчете вводились ограничения гибкостей сжатых и растянутых элементов (согласно Рекомендациям по проектированию структурных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко).

Для более точного анализа зависимости между расположением опорных узлов структурной плиты и ее напряженно-деформированным состоянием было принято решение не ограничивать количество типоразмеров сечений элементов. Такое решение позволяет получить наиболее объективную картину распределения напряжений в структурной плите и экономичности каждого конструктивного решения.

Для всех элементов структурной плиты была принята сталь класса С245. Расчет стальных конструкций производился в пределах упругой работы стали.

Результаты расчета

Деформированная схема модели для одного из вариантов расположения колонн представлена на рисунке 2.

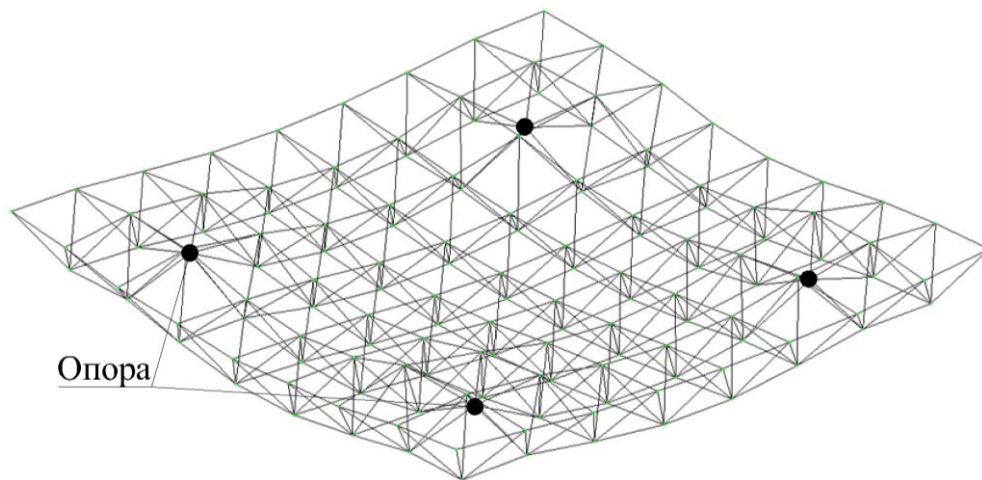


Рис. 2 – Деформированная схема структурной плиты

В таблице 1 приведена масса структурной плиты размером в плане 24x24 м при рассматриваемых вариантах расположения опор, где l_x – расстояние между опорами по оси X, l_y – расстояние между опорами по оси Y, и L – размер нижнего пояса плиты в плане (рис.3).

На схеме расположения опор представлен только нижний пояс структуры, на котором точками отмечены узлы, в которых осуществляется

опирание. В таблице 2 приведены аналогичные данные для плиты 30х30 м, однако было решено не производить расчет всех вариантов расположения опор, а ограничиться расчетом наиболее оптимальных вариантов, опираясь на опыт расчета плиты 24х24 м.

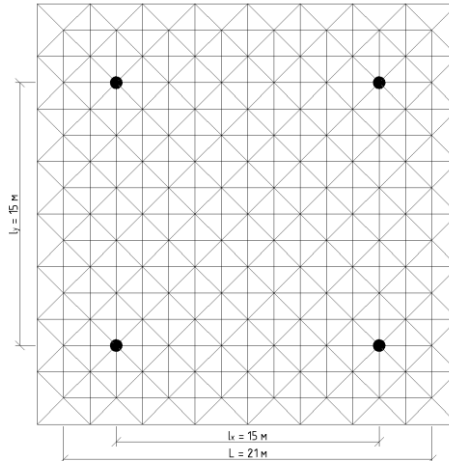


Рис. 3 – План структурной плиты с условными обозначениями

Таблица 1

Изменение массы плиты 24х24 м от расположения опор

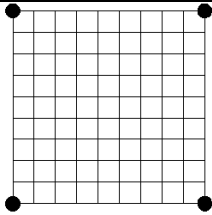
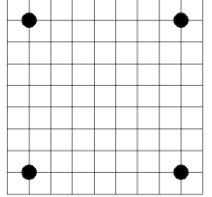
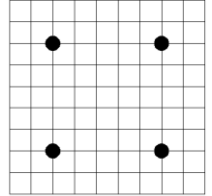
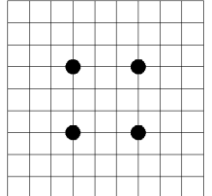
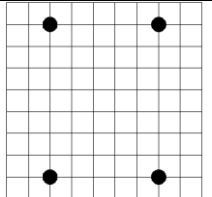
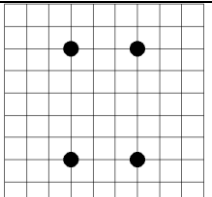
№	$\frac{l_x}{L}, \frac{м}{м}$	$\frac{l_y}{L}, \frac{м}{м}$	G, т	Разница, в %	Схема расположения опор
1	2	3	4	5	6
1	$\frac{21}{21}$	$\frac{21}{21}$	7,035	157	
2	$\frac{15}{21}$	$\frac{21}{21}$	5,809	130	
3	$\frac{9}{21}$	$\frac{21}{21}$	6,021	134	

1	2	3	4	5	6
4	$\frac{3}{21}$	$\frac{21}{21}$	6,679	149	
5	$\frac{15}{21}$	$\frac{15}{21}$	4,482	100	
6	$\frac{9}{21}$	$\frac{15}{21}$	4,771	106	
7	$\frac{3}{21}$	$\frac{15}{21}$	5,440	121	
8	$\frac{9}{21}$	$\frac{9}{21}$	5,063	113	
9	$\frac{3}{21}$	$\frac{9}{21}$	5,728	128	
10	$\frac{3}{21}$	$\frac{3}{21}$	6,302	141	

Так как количество типоразмеров сечений не ограничивалось, их количество в результате итерационного расчета оказалось весьма значительным – от 30 до 40 калибров. Такое большое количество типоразмеров элементов хоть и повышает сложность и трудоемкость монтажа конструкции, но значительно снижает ее массу.

Таблица 2

Изменение массы плиты 30x30 м от расположения опор

№	$\frac{l_x}{L}, \frac{м}{м}$	$\frac{l_y}{L}, \frac{м}{м}$	G, т	Разница, в %	Схема расположения опор
1	2	3	4	5	6
1	$\frac{27}{27}$	$\frac{27}{27}$	15,141	204	
2	$\frac{21}{27}$	$\frac{21}{27}$	9,341	126	
3	$\frac{15}{27}$	$\frac{15}{27}$	7,434	100	
4	$\frac{9}{27}$	$\frac{9}{27}$	10,434	140	
5	$\frac{15}{27}$	$\frac{21}{27}$	8,375	113	
6	$\frac{9}{27}$	$\frac{15}{27}$	8,992	121	

1	2	3	4	5	6
7	$\frac{9}{27}$	$\frac{21}{27}$	9,857	133	

На рис. 4 представлена зависимость массы структурной плиты от координат расположения опор. Для построения графика были взяты варианты расположения опор, где $l_x=l_y$, так как это позволяет построить зависимость и так как среди этих вариантов находятся наиболее выгодные с точки зрения металлоемкости.

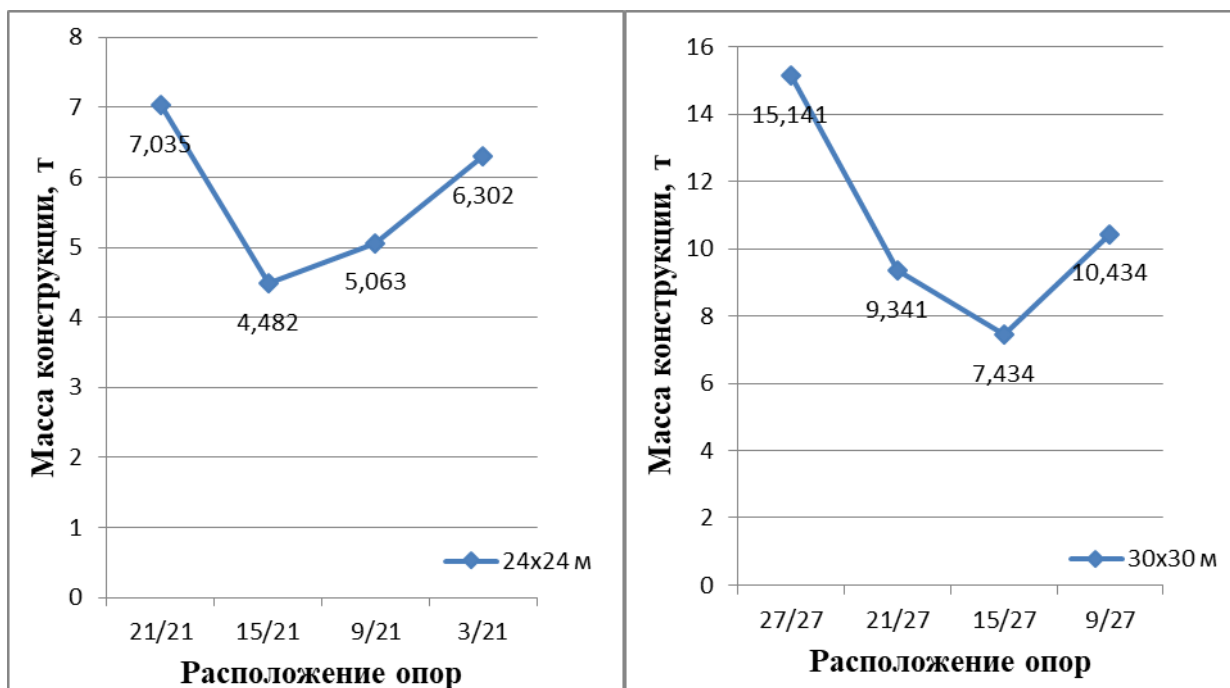


Рис. 4 – зависимость массы конструкции от расположения опор

Выводы

Из полученных результатов можно сделать вывод, что оптимальное, с точки зрения металлоемкости, соотношение между размером структурной плиты в плане и шагом колонн для плиты 24x24 м составляет 15/21 и для плиты 30x30 м составляет 15/27.

Литература

1. Захаренко А.А., Котельникова Т.О., Ращепкина С.А. К проектированию облегченных металлических пространственных покрытий // The Scientific Heritage. 2020. №43-2 (43). С. 1-3.
2. Агафонкин В.С., Моисеев М. В., Исаева Л.А., Дымолазов М.А. Разработка и исследование структурного покрытия актового зала учебно-лабораторного корпуса КГТУ им. А. Н. Туполева // Известия КазГАСУ. 2010. № 2, т. 14. С. 105–110.
3. Никитюк А.В., Московина А.А., Зуева И.И. Достоинства и недостатки структурных конструкций // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2011. №1. 1 с.
4. Hilton J. Space grid structures. Oxford: Architectural Press, 2000. С. 19-21.
5. Structural Engineering Handbook. Lan T. T., под ред. Wai-Fah C., Lui E. М. 2 изд. New York: CRC Press, 2005. pp. 4-5.
6. Шилов А.В., Погорелов В.А., Теняков А.А. Применение структурных покрытий в зданиях каркасного типа // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5227.
7. Василькин А.А., Денякова В.В. Поиск оптимального проектного решения структурной плиты покрытия. Статья в сборнике конференции Теория сооружений: достижения и проблемы: материалы III всероссийской научно-практической конференции, 10-12 октября 2018 г. Махачкала / Дагестанский государственный технический университет. - Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2018. С. 26-32.
8. Демидов Н.Н. Особенности поперечного расчёта структурных конструкций, опирающихся на четыре точки при неравномерном перекосе // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С.50-53.

9. Василькин А.А., Денякова В.В.. Регулирование напряженно-деформированного состояния структурной плиты покрытия // Инженерный вестник Дона. 2018. №. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4868.

10. Морозова Д.В., Серова Е.А. Проблема технико-экономического обоснования при проектировании стыков металлических конструкций // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 219-223.

11. Зуева И.И., Иванова С.Л. Особенности проектирования структурных конструкций типа «ЦНИИСК» // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 1. С.91-97.

References

1. Zakharenko A.A., Kotelnikova T.O., Rashchepkina S.A. The Scientific Heritage. 2020. №43-2 (43). pp. 1-3.

2. Agafonkin V.S., Moiseyev M. V., Isayeva L.A., Dymolazov M.A. Izvestiya KazGASU. 2010. № 2, t. 14. pp. 105–110.

3. Nikityuk A.V., Moskovina A.A., Zuyeva I.I. Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i arkhitektura. 2011. №1.p 1.

4. Hilton J. Space grid structures. Oxford: Architectural Press, 2000. pp. 19-21.

5. Structural Engineering Handbook. T. T. Lan, edited by. C. Wai-Fah, E. M. Lui. 2 ed. New York: CRC Press, 2005. pp. 4-5.

6. Shilov A.V., Pogorelov V.A., Tenyakov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5227.

7. Vasilkin A.A., Denyakova V.V. Statya v sbornike konferentsii Teoriya sooruzheny: dostizheniya i problemy: materialy III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Article in the Theory of Structures: Achievements and Problems conference collection: materials of the III All-Russian scientific and practical conference) (10-12 October 2018, Makhachkala). Makhachkala: DGTU, 2018. pp. 26-32.



8. Demidov N.N. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2015. № 1. pp.50-53.
9. Vasilkin A.A., Denyakova V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №. 2 (49). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4868.
10. Morozova D.V., Serova E.A. Vestnik MGSU. 2012. № 12. pp. 219-223.
11. Zuyeva I.I., Ivanova S.L. Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i arkhitektura. 2013. № 1. pp.91-97.