



Решение задач оптимального проектирования на примере расчета покрытия демонстрационного центра в виде стержневой конструкции из круглых труб

С.В. Щуцкий, А.Ю. Бондаренко, А.С. Болдырев

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Рассматриваются способы регулирования напряженно-деформированного состояния элементов решетчатой конструкции покрытия с помощью изменения схемы решетки в месте сопряжения ригеля и стойки поперечной рамы. Устанавливается зависимость перераспределения усилий в элементах решетчатой рамы от взаимного расположения элементов карнизного узла.

Ключевые слова: решетчатые конструкции, метод конечных элементов, регулирование НДС, оптимальное проектирование.

Одной из основных задач при расчете и проектировании строительных конструкций является создание расчетной схемы, элементы которой при восприятии внешних нагрузок работают наиболее эффективно. Под эффективностью выбранного сечения элемента понимают минимальное значение его геометрических характеристик, необходимое для соблюдения требований действующих норм по прочности и деформации конструкции. Совокупность методов, позволяющих выполнить поиск наиболее эффективной схемы, называется оптимальным проектированием [1,2].

Прикладывая нагрузку к конструкции, инженер в результате ее расчета должен ощущать гармонию игры внутренних сил в ней. В этом смысле справедливо замечание, что неотрегулированная конструкция уподобляется ненастроенному музыкальному инструменту.

Регулирование усилий и перемещений в элементах конструкций на различных стадиях их работы является одной из задач оптимального

проектирования, а также реконструкции и усиления существующих сооружений.

Регулирование напряжений и перемещений может быть выполнено различными способами, например:

- 1) изменением геометрической схемы сооружения;
- 2) созданием усилий (перемещений), компенсирующих в определенной мере нежелательные усилия и перемещения (например, смещение опор);
- 3) предварительным напряжением отдельных элементов конструкции;
- 4) подбором соотношений жесткостей элементов сооружения (элементы большей жесткости «перетягивают» на себя большую часть усилия в статически неопределимых системах);
- 5) выбором схем передачи нагрузки на сооружение в рабочих и монтажных стадиях.

Возможны также комбинации данных способов.

При регулировании усилий обычно ставятся условия достижения равного сопротивления в нескольких наиболее напряженных сечениях. Данное условие выражается в том, что на всех участках конструкции под действием внешних сил возникают одинаковые по значению напряжения, близкие к предельно допустимым [3].

Регулирование устойчивости упругих стержневых систем с центрально-сжатыми элементами (устойчивость первого рода) выражается в регулировании критической силы путём перераспределения сжимающих усилий в системе или изменения длины сжатых элементов. Это может быть достигнуто изменением геометрической схемы сооружения, жесткостей отдельных элементов и связей между ними и другими способами [4].

Регулирование устойчивости упругих стержневых систем со сжато-изогнутыми элементами (устойчивость второго рода) сводится к

регулированию усилий и перемещений, определяемых с учетом влияния продольных сил на изгиб [5].

В качестве объекта исследования рассмотрено покрытие демонстрационного центра, представляющее собой рамно-связевым каркас. Основной несущей конструкцией каркаса демонстрационного центра является стальная решетчатая рама с элементами из круглых труб (рис. 1) пролетом 66 м. Ригель рамы выполнен в виде арочной фермы, передающей усилия через жесткий карнизный узел на стойку рамы – вертикальную решетчатую конструкцию. Таким образом, аналитическая модель данной конструкции – рама, с жестким сопряжением стойки и ригеля.

В подобных конструкциях максимальные изгибающие моменты воспринимает карнизный узел, регулирование геометрии которого является одной из задач оптимального проектирования.

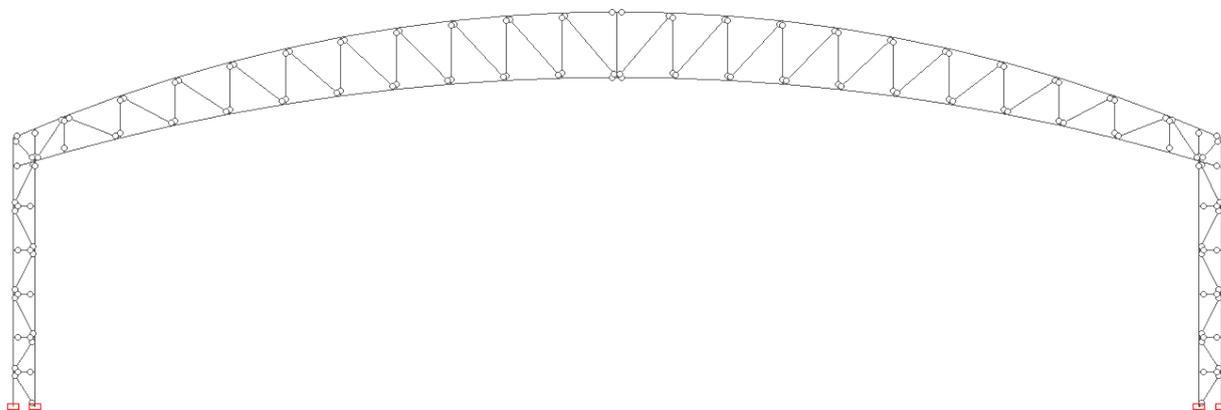


Рис. 1. Схема рамы покрытия

В программном комплексе SCAD [6] построена конечно-элементная модель рамы покрытия. Примыкание элементов решетки к поясам арочной фермы выполнено шарнирным [7].

Внешние нагрузки были сведены к узловым и погонным с учетом коэффициентов, изложенных в п. 10, 11 СП 20.13330.2016..В процессе

исследования к конечно элементной модели рамы прикладывались следующие загрузки (табл. 1)

Таблица 1

Имена загрузений	
Номер	Наименование
L1	Постоянная
L2	Снег (равномерный)
L3	Снег (слева снеговой мешок)
L4	Ветер (слева положительный аэродинамический коэффициент)
L5	Ветер (слева отрицательный аэродинамический коэффициент)
L6	Ветер (справа положительный аэродинамический коэффициент)
L7	Ветер (справа отрицательный аэродинамический коэффициент)

Критерием оптимального подбора сечений являлось значение коэффициента запаса в элементах рассчитываемой модели. Сечение конструктивной группы элементов считалось эффективным, если при выполнении требований по двум предельным состояниям выполнялось два условия:

- 1) коэффициент запаса всех элементов конструктивной группы находится в диапазоне от 0,4 до 1;
- 2) коэффициент запаса наиболее напряженных элементов конструктивной группы находится в диапазоне от 0,9 до 1.

Унифицирование жесткостей элементов и назначение конструктивных групп модели выполнялось с учетом разделения данной конструкции на отправочные марки:

- 2 стойки рамы в виде вертикальной фермы;
- 2 половины арочной фермы с возможностью соединения одного конца со стойкой рамы в карнизном узле, и между собой в коньковой точке покрытия.

При создании расчетной схемы также ставилось условие минимального количества раскреплений в нижнем поясе.

Так как в ходе исследования было установлено, что рядовые элементы решетки фермы воспринимают на порядок меньшие усилия, чем её пояса (рис. 2), сечение раскосов фермы назначалось конструктивно, исходя из оптимального соотношения диаметров сечений решетки и поясов, находящегося в диапазоне от 0,6 до 0,8 [8]. Наиболее неблагоприятная комбинация нагрузжений – $L1+L2+L4\cdot 0,9$.

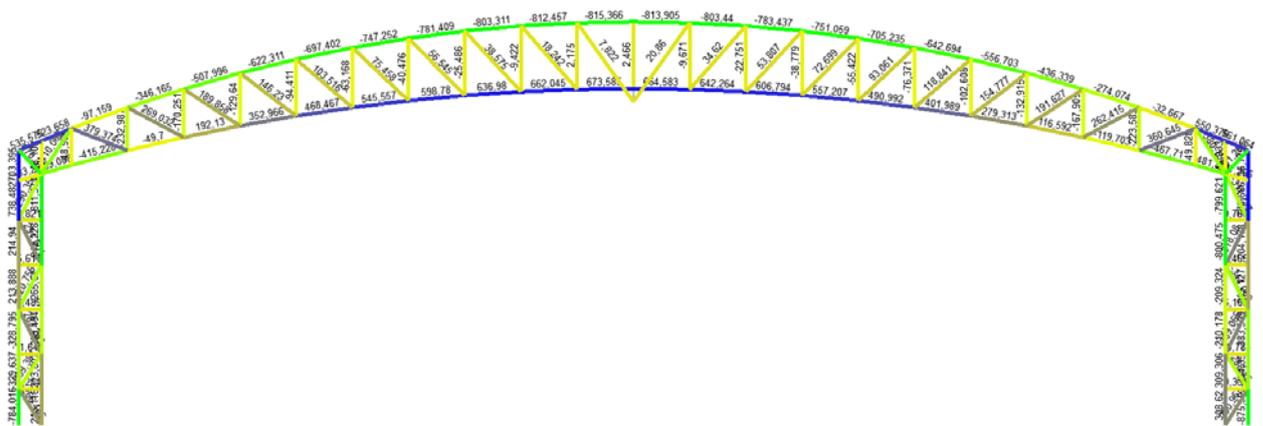


Рис. 2. Распределение усилий от комбинации нагрузжений $L1+L2+L4\cdot 0,9$

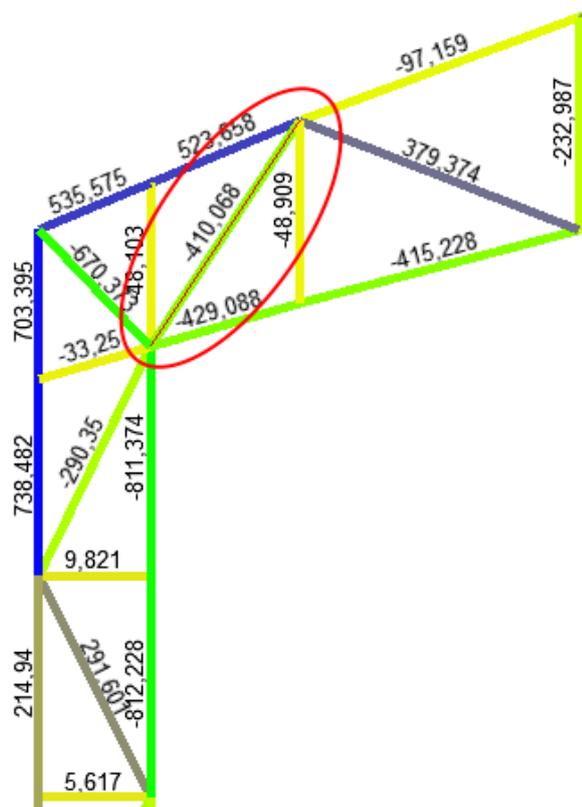


Рис. 3 Распределение усилий в карнизной части рамы

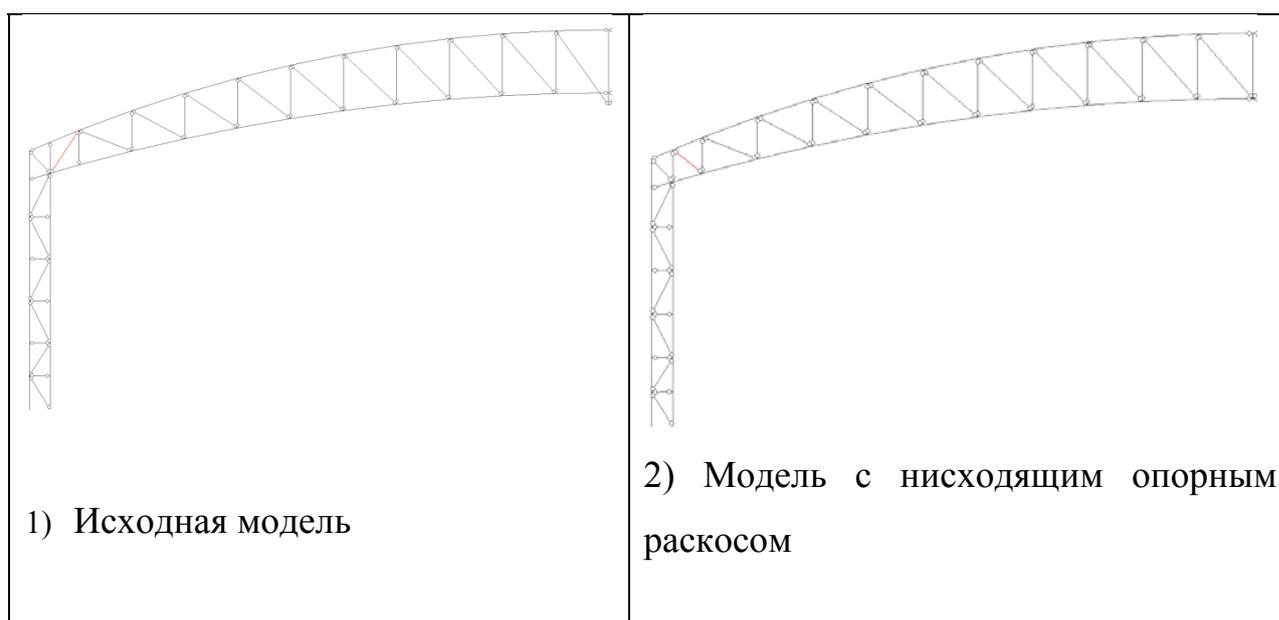
Элементом с наибольшей вероятностью отказа в исследуемой схеме является опорный раскос (рис. 3), воспринимающий усилия, практически равные возникающим в нижнем поясе. Вследствие данного обстоятельства для удовлетворения требованиям норм необходимо принять сечения решетки в карнизном узле близкими по геометрическим характеристикам с поясами, что осложняет монтаж элементов (СП 16.13330.2017) и ведет к возможному перерасходу материала. Было предложено использовать следующие элементы регулирования НДС системы:

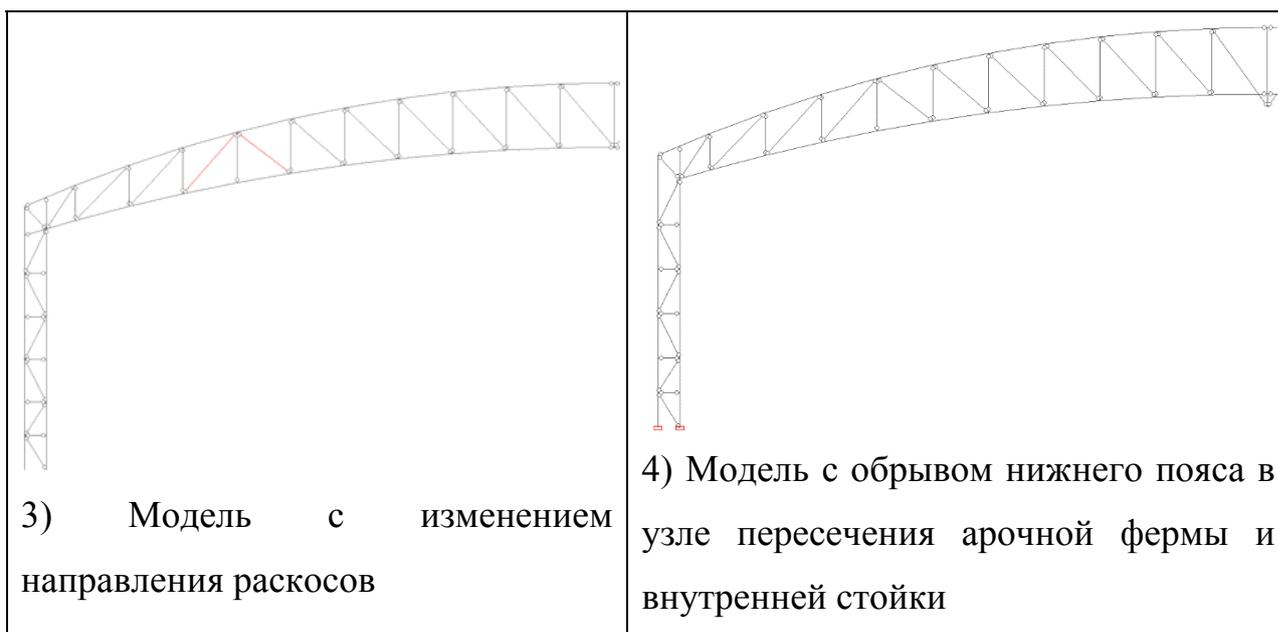
- изменение геометрической схемы решетки арки;
- изменение жесткостей арки с целью перераспределения усилий от решетки к более жестким элементам в статически неопределимой системе [9].

Места изменений направления решетки арки определялись исходя из формы эпюры моментов в ригеле, а именно в местах изменения знака усилий в поясах, обусловленного переменной знака изгибающего момента в ригеле рамы (рис. 2) [10].

В таблице 2 представлены исследуемые варианты схем рамы.

Таблица 2





- 1) Исходная модель с восходящим опорным раскосом;
- 2) Модель с нисходящим опорным раскосом. Перемена направления наклона раскоса обусловлена необходимостью устранить сжимающие усилия, сопоставимые с теми, которые испытывает нижний пояс арочной фермы;
- 3) Модель с изменением направления раскосов в точке изменения знака эпюры изгибающих моментов (рис. 1). Перемена направления обусловлена стремлением сократить количество элементов нижнего пояса, воспринимающих сжимающие усилия (рис. 4);
- 4) Модель с обрывом нижнего пояса в узле сопряжения арочной фермы со стойкой рамы. Обрыв нижнего пояса обусловлен стремлением ограничить действие изгибающего момента в вышеперечисленных вариантах модели, который появлялся вследствие работы нижнего пояса как неразрезной балки (рис. 5).

Таблица 2

Вариант модели / Наименование конструктивной группы	α_{\min}				α_{\max}			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Верхний пояс арки ($m_i=23\%$)	0,283	0,283	0,280	0,280	0,939	0,943	0,970	0,900
Нижний пояс арки ($m_i=33\%$)	0,459	0,320	0,424	0,791	0,905	0,987	0,902	0,989
Рядовые раскосы ($m_i=13\%$)	0,450	0,641	0,252	0,310	0,970	0,948	0,981	0,994
Опорные раскосы ($m_i=3\%$)	0,539	0,399	0,521	0,553	0,911	0,918	0,861	0,947
Элементы стоек рам ($m_i=28\%$)	0,221	0,169	0,212	0,212	0,995	0,907	0,975	0,937
Коэффициент запаса модели $\Sigma m_i \alpha_i$	0,353	0,313	0,312	0,442	0,947	0,947	0,947	0,953

, где α_{\min} и α_{\max} – минимальный и максимальный коэффициенты запаса соответственно

$m_i, \%$ – процент суммарной массы элементов конструктивной группы от массы всей рамы, определенной по результатам исследования

По данным таблицам можно сделать вывод о том, что 4 вариант модели является наиболее эффективным, минимальный коэффициент запаса элементов данной модели является наибольшим среди исследованных вариантов. Максимальный коэффициент запаса во всех вариантах различается не более чем на 0,006.

Таблица 3

Варианты модели:	1	2	3	4
Суммарный вес элементов рамы, т	9,03	9,544	9,537	8,889

Значения суммарного веса конструктивных элементов рамы (табл. 3) подтверждают вывод о том, что 4 вариант модели является наиболее оптимальным, так как изменение направления решетки позволило перенести часть усилий с нижнего пояса на рядовые раскосы, а соединение нижнего пояса с внутренней ветвью стойки рамы позволило устранить изгибающий момент, возникающий вследствие работы пояса как неразрезной балки с большим количеством приставных шарниров в одном узле. В дальнейшем планируется провести исследование в области конструирования данного карнизного узла.

Литература

1. Виноградов А. И. Проблема оптимального проектирования в строительной механике. Харьков, «Вища школа», 1973. 168 с.
2. Yeh-Liang Hsu, Tzu-Chi Liu Developing a fuzzy proportional-derivative controller optimization engine for engineering design optimization problems // Engineering Optimization. Vol. 39, № 6, September 2007, p. 700.
3. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости. Под общ. ред. Абовского Н. П.. М., Стройиздат, 1978. 189 с.
4. Palmer A.C. Optimal structural design by dynamic programming. "Proc. ASCE, Journal of Eng. Mech. Div.", 1968, ST6, v. 94 118 p.
5. Барагунова Л.А., Шогенова М.М.. Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4810.



6. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. М.: Издательство АСВ, 2016. 338 с.
7. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс, 2007. 600 с.
8. Кузнецов В.В. Справочник проектировщика Т.3. М.: АСВ, 1999. 528 с.
9. Алямовский А.А. Solidworks/CosmosWorks: инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК, 2004. 432 с.
10. Киселев В. А. Рациональные формы арок и подвесных систем. М., Стройиздат, 1953. 356 с.

References

1. Vinogradov A. I. Problema optimal'nogo proektirovaniya v stroitel'noj mehanike [The problem of optimal design in structural mechanics]. Har'kov, «Vishhashkola», 1973. 168 p.
2. Yeh-Liang Hsu, Tzu-Chi Liu. Engineering Optimization. Vol. 39, № 6, September 2007, p. 700.
3. Izbrannye zadachi po stroitel'noj mehanike i teorii uprugosti [Selected problems in structural mechanics and elasticity theory]. Pod obshh. red. Abovskogo N. P. M., Strojizdat, 1978. 189 p.
4. Palmer A.C. Optimal structural design by dynamic programming “Proc. ASCE, Journal of Eng. Mech. Div.”, 1968, ST6, v. 94 118p.
5. Baragunova L.A., Shogenova M.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4810.
6. Gorodeckij A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N. Komp'yuternoe modelirovanie v zadachah stroitel'noj mehaniki [Computer modeling in problems of structural mechanics]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2016. 338 p.



7. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ih analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis]. M.: DMK Press, 2007. 600 p.
8. Kuznecov V.V. Spravochnik proektirovshhika [Designer Reference]. T.3. M.: ASV, 1999. 528 p.
9. Aljamovskij A.A. Solidworks/CosmosWorks: inzhenernyj analiz metodom konechnyh jelementov [Finite element engineering analysis]. M.: DMK, 2004. 432 p.
10. Kiselev V. A. Racional'nye formy arok i podvesnyh sistem [Rational forms of arches and suspension systems]. M., Strojizdat, 1953. 356p.