



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

№4, ТОМ 14 (2008) 263-268

УДК 624.071.2

(08)-0172-1

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВИСЯЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗІ ЗМІННОЮ РОЗРАХУНКОВОЮ СХЕМОЮ

О.М. Болдирев, А.О. Свентиков

*Воронезька державна архітектурно-будівельна академія,
84, вул. 20-річчя Октября, 394006, м. Воронеж, Російська Федерація.*

E-mail: prezident@vgasu.vrn.ru

Отримана 20 жовтня 2008; прийнята 27 жовтня 2008

Анотація. Розглядається задача пошуку оптимальних фізичних та геометричних компонентів параметрів висячих просторових покриттів. Задача формулюється як багато параметрична, однокритеріальна, нелінійна, неявного виду. В основу локального пошуку покладена ідея методу Хука-Дживса. Глобальний пошук виконується методом пробних точок. Отримані області раціональних компонентів значень висячих просторових покриттів з використанням перехрестних гнучких ниток. Оцінка напружено-деформованого стану здійснюється з використанням кінцево-елементного алгоритму з урахуванням змінності розрахункової схеми.

Ключові слова: висячі покриття, параметр, пошук, напруження.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВИСЯЧИХ КОНСТРУКЦИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ РАСЧЕТНОЙ СХЕМОЙ

А.М. Болдырев, А.А. Свентиков

*Воронежская государственная архитектурно-строительная академия,
84, ул. 20-летия Октября, 394006, г. Воронеж, Российская Федерация.*

E-mail: prezident@vgasu.vrn.ru

Получена 20 октября 2008; принята 27 октября 2008

Аннотация. Рассматривается задача поиска оптимальных физических и геометрических компонентных параметров висячих пространственных покрытий. Задача формулируется как многопараметрическая, однокритериальная, нелинейная, неявного вида. В основу локального поиска положена идея метода Хука-Дживса. Глобальный поиск выполняется методом пробных точек. Получены области рациональных компонентных значений висячих пространственных покрытий с использованием перекрестных гибких нитей. Оценка напряженно-деформированного состояния осуществляется с использованием конечно-элементного алгоритма с учетом переменности расчетной схемы.

Ключевые слова: висячее покрытие, параметр, поиск, напряжение.

APPLICATION OF METHODS OF PARAMETRIC OPTIMIZATION IN STUDYING SUSPENDED STRUCTURES WITH A VARIABLE DESIGN SCHEME

A.M. Boldyrev, A.A.Sventikov

*Voronezh State Architecture and Civil Engineering University,
84, the 20-th Anniversary of October Str., Voronezh, Russia.*

E-mail: prezident@vgasu.vrn.ru

Received 20 October 2008; accepted 27 October 2008

Abstract. There is considered the problem of searching optimum physical and geometrical layout parameters of suspended spatial coverings. The problem is formulated as a multi-parameter one-criterion, nonlinear one of an implicit kind. The basis of the local search is the Hook-Jivce method. The global search is done by the method of sampling points. An estimation of the stress-strain state is accomplished with the use of a finite-element algorithm, a design scheme variability being taken into consideration. Using cross flexible strings There have been obtained the areas of the rational layout values of the suspended spatial coverings.

Keywords: suspended covering, parameter, criterion, search.

Проектирование строительных конструкций основывается на результатах их расчета различными методами строительной механики с последующей проверкой их эксплуатационных свойств. При таком подходе качество проектных решений во многом определяется квалификацией проектировщика. Строительные конструкции, а особенно висячие пространственные покрытия, относятся к сложным многопараметрическим системам, для которых достаточно сложно выбрать «удачные» первоначальные компоновочные параметры.

В общем виде задача оптимизации конструктивных параметров формулируется следующим образом: требуется найти оптимальные значения параметров заданной конструктивной формы висячей системы, которая отвечает экстремальному значению целевой функции. В качестве целевой функции будем использовать приведенную массу конструкции [1]:

$$G = \sum_{i=1}^{n_e} A_i \cdot l_i \cdot \gamma_i \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \varphi_i, \quad (1)$$

где G – масса конструкции; $A_i \cdot l_i \cdot \gamma_i$ – поперечное сечение, длина и объемная масса i -го элемента; $\alpha_i \cdot \beta_i \cdot \varphi_i$ – конструктивный коэффициент, коэффициенты стоимости от использования стали повышенной прочности; n_e – количество элементов.

При этом на конструкцию накладываются следующие ограничения:

– по прочности элементов:

$$\phi_i = \sigma_i - R_i \leq 0; \quad i = 1, 2, \dots, n_e; \quad (2)$$

– по жесткости (деформативности) конструкции:

$$\delta_j = f_j - [f_j] < 0; \quad j = 1, 2, \dots, n_u; \quad (3)$$

– по минимально допустимым значениям оптимизационных параметров:

$$\chi_k = P_k - P_k^{\min} \geq 0; \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где σ_i, R_i – напряжение и предельное напряжение i -го элемента; $f_j, [f_j]$ – значение и предельное значение j -го контролируемого перемещения; n_u – количество контролируемых перемещений, P_k, P_k^{\min} – k -ый оптимизационный параметр и его минимально допустимое значение; n – количество оптимизационных параметров (размерность оптимизационной задачи).

Таким образом, поставленная задача параметрической оптимизации висячих конструкций относится к классу однокритериальных задач условной оптимизации [1,2]. Учитывая, что зависимость между целевой функцией и оптимизационными параметрами является нелинейной и неявного вида, а также, что висячие системы характеризуются переменной расчетной схемой [6], применение для её решения оптимизационных методов, основанных на использовании производных, является нецелесообразным [1,2,3]. Исходя из этого, для нахождения

экстремума целевой функции применим вычислительную схему, основанную на реализации идеи метода Хука-Дживса [2,3].

Поиск представляет собой итерационный процесс (переход от одной точки в пространстве поиска к другой), состоящий из исследующего поиска (выбор направления следующего шага поиска) и пробных шагов по образцу (поиск в выбранном направлении). Физически точки в пространстве поиска представляют собой заданную конструктивную форму с некоторыми геометрическими и физическими параметрами из области допустимых значений.

При исследующем поиске каждая координата (оптимизационный параметр) по очереди изменяется добавлением или вычитанием шага поиска с последующей проверкой условия улучшения целевой функции. Если эта проверка выполняется, то новое значение исследуемого оптимизационного параметра запоминается. В результате исследования всех n параметров находится новая точка, в направлении которой следует продолжать поиск. В том случае, если не удастся определить направление дальнейшего поиска (новую базовую точку), выполняется уменьшение шага поиска. Поиск считается законченным, если в результате исследующего поиска с минимально допустимым шагом не удастся найти новую базовую точку.

Отметим, что геометрические параметры (пролет, шаг конструкций и т.д.), как правило, значительно отличаются по абсолютным размерам от физических параметров (высота сечения, осевая и изгибная жесткость и т.д.), а также то, что оптимизационные параметры могут иметь разные размерности. В настоящей работе для приведения параметров к обобщенному используется масштабирование путём деления текущих значений на соответствующие значения базовой точки.

При поиске по образцу выполняется шаг в направлении, выбранном при исследующем поиске. Для ускорения сходимости вводится корректировка шага поиска, зависящая от косинуса угла между двумя последними направлениями поиска. При этом новая точка поиска вычисляется по следующим формулам:

$$\overline{X}_{i+1} = \overline{X}_i + \Delta_{i+1} \cdot \overline{W}_{i+1}; \quad (5)$$

$$\Delta_{i+1} = \Delta_i \cdot K_i; \quad (6)$$

$$K_i = a^{\cos \varphi_i - \cos \varphi_0}; \quad (7)$$

$$\cos \varphi_i = \frac{\overline{A_{i-1}A_i} \cdot \overline{A_{i-2} \cdot A_{i-1}}}{|\overline{A_{i-1}A_i}| \cdot |\overline{A_{i-2} \cdot A_{i-1}}|}, \quad (8)$$

где $\overline{X}_{i+1}, \overline{X}_i$ – векторы координат новой и текущей базовой точек поиска; A_i, A_{i-1}, A_{i-2} – базовые точки поиска на i -ом, $i-1$ -ом, $i-2$ -ом шаге поиска; Δ_{i+1}, Δ_i – длина $i+1$ -го и i -го шага поиска; \overline{W}_{i+1} – вектор $i+1$ -го направления поиска; φ_i – угол между i -ым и $i-1$ -ым направлениями поиска (\overline{W}_i и \overline{W}_{i-1}); K_i – i -ый коэффициент корректировки длины шага поиска; a, φ_0 – параметры поиска.

Параметр φ_0 определяет угол кругового конуса при вершине поиска (базовая точка). Поверхность конуса является местом нахождения таких направлений \overline{W}_i , для которых длина шага не изменяется. При отклонении вектора направления внутрь или наружу длина шага поиска соответственно или увеличивается, или уменьшается.

Предложенный алгоритм поиска обеспечивает нахождение только локального экстремума целевой функции. Для получения глобального решения используется метод пробных точек [2,3]. При этом методе локальный поиск стартует из нескольких пробных точек, которые могут быть заданы как случайным образом, так и по определенному алгоритму. Таким способом, находится несколько локальных минимумов, из числа которых затем производится выборка наименьшего. Последний и принимается за глобальный.

Вычисление целевой функции выполняется в три этапа: определение напряженно-деформированного состояния конструкции, его проверка условиям прочности и жесткости и непосредственно само вычисление целевой функции. В настоящей работе расчет висячих пространственных покрытий осуществляется по конечно-элементному алгоритму расчета с учетом геометрической нелинейности [4]. При этом учитывалось провисания гибких нитей от действия собственного веса, а также выключаемость из расчетной схемы конструкции «сжатых» гибких стержней.

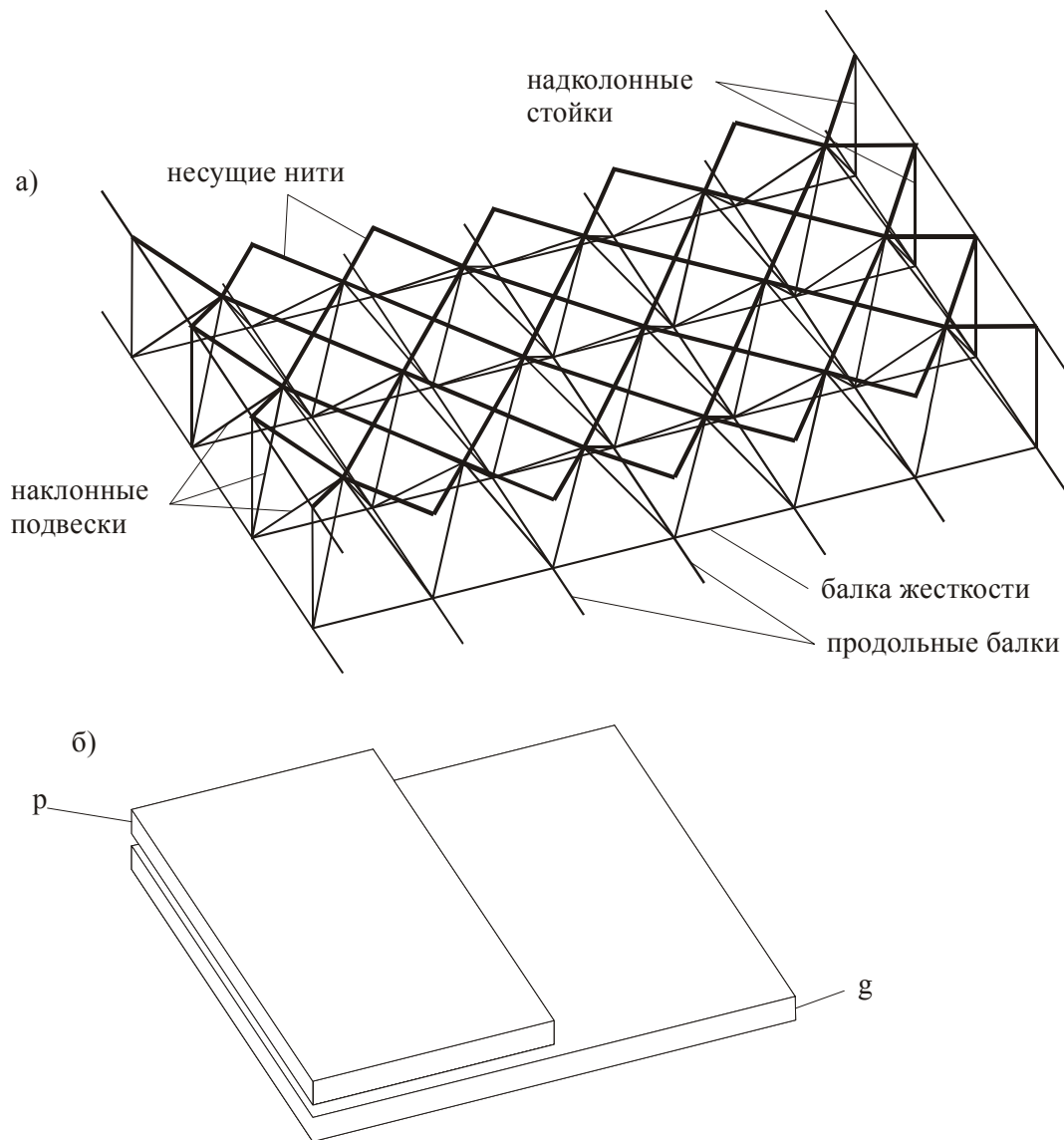


Рис. 1. Пространственная висячая система: а – конструктивная схема; б – схема загрузки.

Исследуем висячее пространственное покрытие с использованием перекрестных несущих нитей, двояко-наклонных подвесок и системы поперечных балок жесткости и продольных балок (рис.1). В качестве исходной используется висячая конструкция со следующими топологическими параметрами: пролет – 72 м; число шагов колонн и продольных балок – 6 (т.е. ортогональная система балок в плане представляет собой сетку 6×6), соотношение шага колонн к шагу продольных балок – 1 (т.е. сетка балок квадратная со стороной 12 м); каждый узел соединения поперечных и продольных балок соединялся со

смежными четырьмя узлами несущих канатов двояко-наклонных подвесок, несущие нити образуют цилиндрическую поверхность параболического очертания. В исследованиях использовались следующие схемы загрузки временной нагрузкой: схема с приложением половины пролета равномерно распределенной нагрузкой (несимметричная распределенная схема); схема с равномерно распределенной нагрузкой нагруженной по всей площади покрытия (симметричная распределенная схема); схема с нагружением в центральном узле сосредоточенной силой (симметричная сосредоточенная схема).

В качестве оптимизационных, принимались следующие параметры висячего покрытия:

- стрела провеса несущих нитей f (цилиндрической поверхности образуемой несущими нитями);
- минимальный зазор между несущими нитями и ортогональной системы балок z_0 ;
- высота поперечного сечения несущих нитей (осевая жесткость EA_{nn});
- высота поперечного сечения наклонных подвесок (осевая жесткость EA_{nn});
- высота поперечного сечения поперечных балок жесткости (изгибная жесткость $EJ_{бж}$);
- высота поперечного сечения продольных балок ортогональной балочной системы (изгибная жесткость $EJ_{пб}$);
- высота поперечного сечения надколонных стоек (осевая жесткость $EA_{нс}$);
- высота поперечного сечения колонн (осевая жесткость EA_k).

Первые два параметра являются геометрическими, а остальные – физическими. Для формирования обобщающих выводов о поведении висячих покрытий с треугольной решеткой получаемые абсолютные результаты приводились к известным относительным коэффициентам [5]:

$$f_0 = L / f ; z_0 = (f + z) / f ; n_0 = \frac{EJ_{бж}}{EA_{nn} \cdot L^2} ;$$

$$n_2 = \frac{EA_n}{EA_{nn}} ; n_3 = \frac{EJ_{пб}}{EJ_{бж}} ; n_4 = \frac{EA_{нс}}{EA_k} . \quad (9)$$

При выполнении оптимизации компоновочных параметров в качестве начальных значений принимались пять различных конструктивных систем, определенных в соответствии с рекомендациями [5].

По результатам выполненных исследований были найдены следующие диапазоны оптимальных значений компоновочных параметров изучаемых висячих покрытий:

- $f_0 : 8,5 \div 9,5$;
- $z_0 : 1,07 \div 1,1$;
- $n_0 : 1,5 \cdot 10^{-4} \div 2,5 \cdot 10^{-4}$;
- $n_2 : 0,25 \div 0,35$;
- $n_3 : 0,75 \div 0,9$;
- $n_4 : 1,2 \div 1,3$.

Найденные оптимальные параметры пространственных висячих конструкций достаточно близки для разных схем загрузки, что подтверждает ранее сделанные выводы о высокой пространственной жесткости изучаемых покрытий. Изменение интенсивности временной нагрузки регулируется в основном изменением относительной стрелой провеса и зазором между несущими нитями и балочной системой. Данный факт, по нашему мнению, можно объяснить значительным влиянием на напряженно-деформированное состояние висячих конструкций несущей способности несущих нитей.

В расчетах было установлено, что при уменьшении расхода материала на произвольный элемент конструкции, в основном увеличиваются напряжения в данном элементе, а при увеличении происходит рост напряжений в примыкаемых к нему смежных элементов. В связи с этим возникает некоторый парадокс: с ростом расхода материала конструкция может перестать удовлетворять эксплуатационным требованиям. В то же время при этом в процессе поиска может возникнуть такая ситуация, когда некоторые оптимизационные параметры нельзя будет не увеличивать, не уменьшать. Данное явление можно объяснить тем, что восприятие нагрузки в висячих пространственных покрытиях осуществляется по некоторым цепочкам взаимосвязанных конструктивных элементов, определяемых топологическими особенностями конструкции и схемой её нагружения [6]. В основном это касается групп смежных гибких элементов: несущих нитей и наклонных подвесок.

По сравнению с плоскостными висячими конструкциями с треугольной решеткой изучаемые пространственные покрытия отличаются меньшими значениями относительной стрелы провеса f_0 и относительного зазора z_0 , что свидетельствует о более высоком влиянии на напряженно-деформированное состояние покрытия балочной системы. По сравнению с пространственными висячими покрытиями, образованными из плоских поперечников, конструкции с перекрестными гибкими стержнями отличаются более высокими коэффициентами жесткостей конструктивных элементов $n_0 \div n_4$, что вызвано большей локализацией

кинематических перемещений в данных конструкциях и соответственно топологической локализацией конструктивной схемы.

На основании выше изложенного, можно сделать выводы:

1. Предложенный алгоритм параметрической оптимизации весьма эффективен при выборе компоновочных параметров висячих про-

странственных покрытий, а проведенные исследования выявили области наиболее экономичных инженерных решений данных конструкций.

2. Пространственные висячие покрытия с использованием перекрестных висячих элементов обладают высокой эксплуатационной надежностью.

Литература

1. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций.–М.: Стройиздат, 1979.–319 с.
2. Реклейтис Г., Рейвинд А., Рэгвдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн.1.–М.: Мир, 1986.–349 с.
3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование.–М.: Мир, 1975.
4. Свентиков А.А. Геометрически нелинейный расчет висячих конструкций // Современные методы статического и динамического расчета сооружений и конструкций.–Воронеж: Изд.ВПИ, 1993.–Вып.2.–С.115-125.
5. Кирсанов Н.М. Висячие покрытия производственных зданий.–М.: Стройиздат, 1990.–128 с.
6. Свентиков А.А., Бахтин В.Ф. Расчет висячих стержневых конструкций с учетом переменности расчетной схемы // Современные методы статического и динамического расчета сооружений и конструкций.–Воронеж: Изд.ВГАСА, 1998.–Вып.4.– С.44-51.

Болдырев Александр Михайлович є Президентом Воронежського державного архітектурно-будівельного університету, член-кореспондент Російської академії архітектури і будівельних наук, академік Міжнародної академії наук вищої школи. Наукові інтереси: підвищення надійності зварюваних металоконструкцій, управління кристалізацією металу шва при зварюванні плавленням.

Свентиков Андрій Олександрович є доцентом кафедри «Металеві конструкції та зварка в будівництві» Воронежського державного архітектурно-будівельного університету. Наукові інтереси: просторові покриття будинків і споруд, висячі стержневі системи підвищеної жорсткості з використанням гнучких елементів.

Болдырев Александр Михайлович является Президентом Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, академик Международной академии наук высшей школы. Научные интересы: повышение надежности сварных металлоконструкций, управление кристаллизацией металла шва при сварке плавлением.

Свентиков Андрей Александрович является доцентом кафедры «Металлические конструкции и сварка в строительстве» Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Научные интересы: пространственные покрытия зданий и сооружений, висячие стержневые системы повышенной жесткости с использованием гибких элементов.

Boldyrev Alexander Mihailovich – President of Voronezh Architecture and Civil Engineering University, a corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering Sciences, an academician of the International Academy of Sciences of the Higher School. Scientific interests: an increase of the reliability of welded metal structures, control of a metal seam crystallization in fusion welding.

Sventikov Andrey Aleksandrovich – an Associate professor of the Department «Metal Structures and Welding in Construction» of Voronezh State Architecture and Civil Engineering University. Scientific interests: spatial coverings of buildings and structures, suspended rod systems of a higher rigidity with flexible elements.