

УДК 692.45

***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ СТРЕЛЫ ПОДЪЁМА  
СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ НА ЕЁ МАССУ И ПРОГИБ***

***Иванова С.С.***

*магистрант,*

*Тамбовский государственный технический университет,*

*Тамбов, Россия*

***Умнова О.В.***

*кандидат технических наук, доцент,*

*Тамбовский государственный технический университет,*

*Тамбов, Россия*

***Аннотация***

В работе представлены обоснования поиска оптимальной геометрической формы стальных цилиндрических оболочек. С использованием программного комплекса были построены три параметрические модели оболочек различного поперечного очертания, произведено теоретическое определение массы и прогибов конструкций в зависимости от стрелы подъема. По результатам исследований построены зависимости, отражающие изменение данных параметров.

**Ключевые слова:** формообразование, оптимизация параметров оболочек, стальные оболочки, цилиндрические оболочки, покрытия зданий.

***A STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STEEL GRID SHELL'S  
HEIGHT TO ITS WEIGHT AND DEFLECTION***

***Ivanova S.S.***

*undergraduate,*

*Tambov State Technical University,*

*Tambov, Russia*

***Umnova O.V.***

*Candidate of technical sciences, senior Lecturer,*

*Tambov State Technical University,*

*Tambov, Russia*

### **Annotation**

The main objective of this article is to justify the search of optimal design of steel grid shells. Using the software complex three parametric models of shells of different cross shapes was built. Then we theoretically found determination of the masses and deflections of structures depending on the shell height. The results of the research are presented in graphs showing the change in these parameters.

**Keywords:** form-finding, parameters optimization, steel grid shells, cylindrical shell, coverage of buildings.

В последнее время доля проектирования и возведения общественных зданий на строительном рынке значительно возросла, таких как торговые центры, выставочные залы и павильоны, различные спортивные сооружения. Объёмно-планировочное решение таких зданий предусматривает универсальное использование пространства, гибкую планировку и возможности расширения здания. Каждое подобное здание становится знаковым для города.

Одним из вариантов покрытий подобных зданий являются стальные сетчатые оболочки. По своей форме они гармоничны, изящны и выразительны, позволяют создавать сложные изогнутые поверхности и добиваться архитектурной выразительности здания.

Сетчатые оболочки позволяют перекрывать значительные пространства без использования внутренних опор, используя только самонесущие свойства самой конструкции. При этом жесткость оболочек достигается за счет геометрии конструкции при инженерных расчетах, без увеличения массы материала.

Сетчатой оболочке можно придать любую оригинальную пластическую форму, однако её геометрия должна также соотноситься с нагрузками, действующими на конструкцию [5]. При проектировании оболочек должен

быть соблюден баланс между архитектурной выразительностью, уменьшением материалоемкости и трудозатрат на возведение конструкции.

Разнообразие геометрии сетчатых оболочек делает актуальной задачу направленного поиска рациональных схем, конструктивных решений и условий применения таких систем.

Среди всех традиционно определяемых параметров конструкции (выбор материала, поперечное сечение элементов, вид узлов, общая геометрия конструкции, типология узлов, вид опирания и т.д.) наибольшее значение имеет общая геометрия. Именно она определяет надёжность, устойчивость и безопасность конструкции. Оболочка состоит из тонких стержней, работающих преимущественно на сжатие и растяжение, поэтому при проектировании следует избегать работы оболочки на изгиб [5].

Методы формообразования оболочки заключаются в поэтапном приближении к оптимальной конфигурации путём постепенного изменения геометрии (например, поэтапного увеличения стрелы подъёма или пролёта конструкции) с использованием всё более точных шагов-итераций с течением времени [4].

В связи с отсутствием совершенного аппарата для решения задач, связанных с объективной сопоставительной оценкой различных вариантов конструкций оболочек, на этапе формообразования оболочки покрытия в нашем исследовании использовалась программа Rhinoceros 3D, предназначенная для моделирования 3D геометрии. Для задания параметров геометрии оболочки использовался плагин Grasshopper, а для добавления характеристик материала и анализа заданной конструкции – Karamba.

При помощи программы, работающей совместно с плагинами, стало возможным создание параметрической модели, отдельные характеристики которой можно легко изменять. Также есть возможность приложения различных нагрузок к схеме (собственного веса, равномерно распределённых, узловых), выбора вида и места передачи опорных нагрузок, материала, как всей конструкции, так и отдельных стержней.

Плагин Karamba производит анализ конструкции, можно получить вид деформированной конструкции, значения перемещения узлов, значения опорных реакций и усилий в отдельных стержнях.

Благодаря этим пользовательским модулям могут быть реализованы итеративные методы поиска структурных форм в параметрическом процессе трехмерного проектирования [4].

Созданная модель оболочки обладает высокой эффективностью по затратам времени и позволяет с большой достоверностью выявить влияние на критерий оптимизации различных факторов (высоты, размеров ячеек сеток, схем, условий опирания) при последовательном изменении каждого из них.

Рациональное формообразование сетчатой оболочки снижает её материалоемкость. Масса как объективный критерий сравнения экономичности принятых проектных решений конструкций удобен тем, что входит как составляющая практически в любой другой критерий (например, стоимость, трудоёмкость и прочее) [1].

Сопоставление конструкций по какому-либо критерию должно выполняться в равных условиях по нагрузкам, условиям опирания и материалу [2]. Исходя из этого, выполнено сравнение характеристик массы и прогибов оболочек различного очертания: кругового, параболического и цепного. Геометрические характеристики оболочек могли быть взяты безразмерными, но для повышения точности конструктивного расчета размеры оболочек в плане приняты конкретными, в частности на прямоугольном плане 12x24 м.

На рисунке 1 представлены модели трёх исследуемых оболочек.

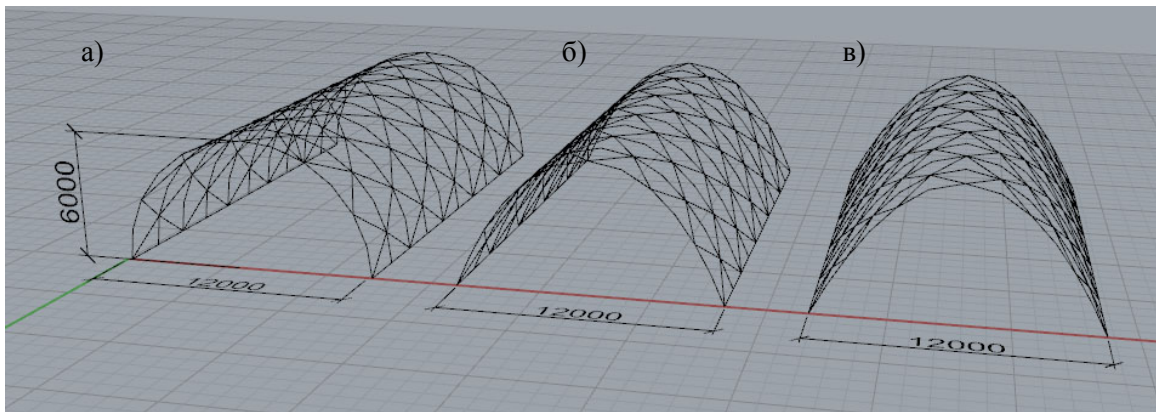


Рис.1 – Модели исследуемых оболочек с различным очертанием:

а) круговым; б) цепным; в) параболическим

В принципе достаточно взять конструкцию лишь одного размера, поскольку теория подобия устанавливает однозначные зависимости между усилиями геометрически подобных систем. Однако для повышения точности результатов также требуется проведение эксперимента с оболочками постоянного пролёта, но с различными длинами.

Влияние формы оболочки и высоты стрелы подъёма на деформативность и массу было изучено при следующих параметрах:

- постоянный размер в плане: 12x24 м;
- количество опорных узлов: 5 (в торцах) x 11 (в пролётах);
- количество ячеек: 12x10 шт;
- материал и профиль стержней: стальная труба 42x3 мм, сталь С-235;
- внешние нагрузки на сетку: узловые вертикальные, направленные вниз  $F=2$  кН;

При сборе нагрузок учитывалась нагрузка от собственного веса конструкции оболочки.

Сетчатая оболочка принята однослойной с треугольной сеткой. Чтобы обеспечить геометрическую неизменяемость системы, сетку закрепляют в плоскостях торцов оболочки [3].

Суть исследования заключалась в создании трёх моделей оболочек с

последующим изменением стрелы подъёма от 0 м до 10 м с шагом 0,4 м. При каждом шаге величины стрелы подъёма фиксировался максимальный прогиб конструкции (мм) и её масса (кг).

По полученным данным были построены сравнительные графики для абсолютных значений массы и деформаций трёх конструкций в зависимости от отношения  $f$  (стрелы подъёма) к  $l$  (пролету).

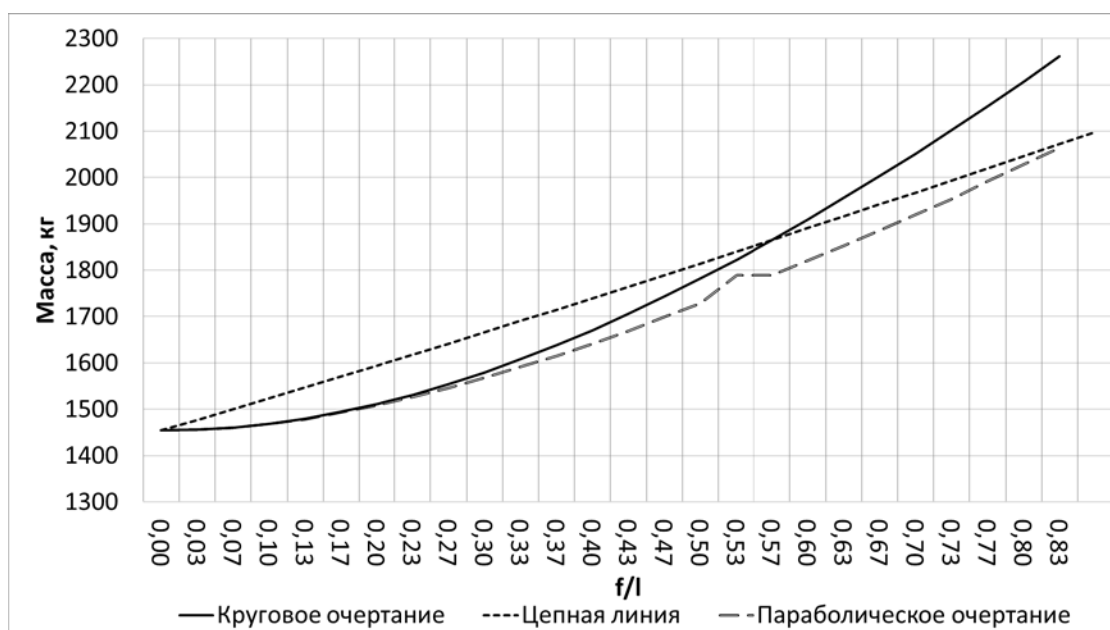


Рис.2 – Зависимость массы конструкции от высоты стрелы подъёма

По результатам расчетов и их анализа установлено влияние на массу оболочки стрелы подъёма для трёх вариантов поперечной формы оболочки (см. рис.1). При увеличении отношения  $f/l$  с 0 до 0,57 наибольшей массой обладает оболочка в виде цепной линии (см. рис.1, б), массы оболочек с круговым (см. рис.1, а) и параболическим (см. рис.1, в) очертанием приблизительно равны. При дальнейшем увеличении стрелы подъёма значительно расчёт масса круговой оболочки, в то время как параболическая и цепная оболочка стремятся к одинаковому значению массы.

Зависимость массы конструкции от высоты стрелы подъёма для трех вариантов очертания сетчатой оболочки представлена графически на рисунке 2. Из полученных зависимостей видно, что наиболее экономичной по материалу

является оболочка с параболическим очертанием. Оболочку с круговым очертанием целесообразно использовать при отношении  $f/l < 0,57$ , оболочку в виде цепной линии при  $f/l > 0,23$ , оболочки параболического и кругового очертания эффективны по затратам металла до  $f/l < 0,23$ , при больших значениях  $f/l$  наименее материалоемкой становится оболочка параболического очертания.

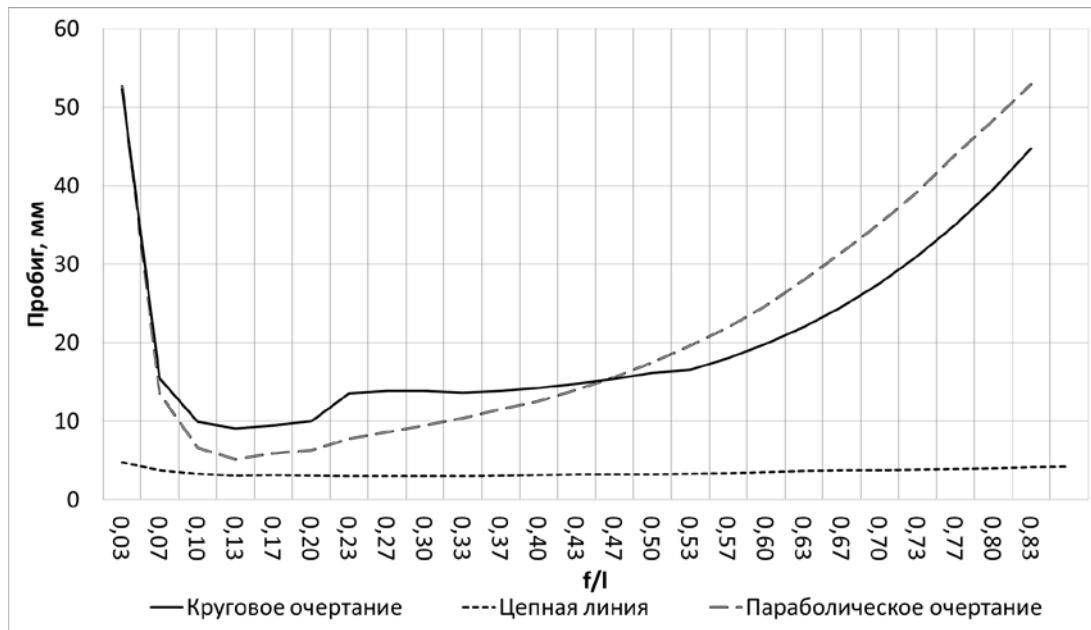


Рис.3 – Зависимость прогиба конструкции от высоты стрелы подъема

Также были проведены исследования зависимости прогиба конструкции от высоты стрелы подъема, результаты которого представлены на рисунке 3. При анализе результатов расчетов установлено влияние формы очертания оболочки на значение максимального прогиба конструкции. Для очертания оболочки в виде цепной линии (см. рис.1, б) прогибы стабильно имеют небольшое значение при различных значениях стрелы подъема  $f/l$ . При круговом и параболическом очертании (см. рис.1, а, в) прогибы в несколько раз больше, причём при  $f/l < 0,47$  прогибы параболической оболочки меньше, чем круговой, а при  $f/l > 0,47$  наблюдается противоположная ситуация.

Если принимать за критерий рациональности максимальный прогиб конструкции, оболочка, имеющая очертание в виде цепной линии имеет преимущество перед круговым и параболическим очертанием.

Таким образом, в ходе работы были построены и проанализированы параметрические модели трёх оболочек различного очертания. Зависимости массы и прогиба от величины стрелы подъема для оболочек с очертанием в виде цепной линии близки к линейным (см. рис. 2, 3), а для круговых и параболических оболочек эти зависимости имеют сложную криволинейную форму. Следовательно, цепные оболочки имеют наименьший приблизительно постоянный прогиб при различных значениях стрелы подъема. В то же время наименьшей массой обладают оболочки параболического очертания.

### **Библиографический список:**

1. Алпатов В.Ю. Оптимизация геометрической формы просторово-стержневых конструкций / В.Ю. Алпатов // Металлические конструкции. – 2009. – №1. том 15.
2. Клячин А.З. Металлические решётчатые пространственные конструкции регулярной структуры / А.З. Клячин – Е.: Диамант, 1994. – 277 с.
3. Рюле Г. Пространственные покрытия. Том II. Металл, пластмассы, керамика, дерево / Г. Рюле – М.: Стройиздат, 1974. – 248 с.
4. Fritzsche J.C. Gridshell efficiency optimization / J.C. Fritzsche – Eindhoven University of Technology, 2013. – 157 p.
5. Richardson J.N. Coupled form-finding and grid optimization approach for single layer grid shells / J.N. Richardson – Elsevier Ltd., 2013. – p. 230-231.