

# МОНТАЖНЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАБОТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

10'16  
(889)  
ОКТАБРЬ

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал

Издается с июля 1939 г.

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**Хуснутдинов Фаниль Тагирович;**  
**Луговской Владимир Петрович;**  
**Брусникина Ольга Борисовна;**  
**Шухман Майсей Григорьевич;**  
**Ишмухаметова Мнавера Назхатовна.**

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационный номер ПИ №77 - 12371 от 19 апреля 2002 г.

Юридический адрес: 123001, Москва, Б.Садовая, 8 стр.1. ЗАО «Журнал Монтажные и специальные работы в строительстве»

[www.montazhnie.ru](http://www.montazhnie.ru) журналмонтажные.рф

### Почтовый адрес редакции:

Московский офис: 105318, г. Москва.  
Ул. Ибрагимова, дом 15 корпус 2-3  
Уфимский офис: 450064, г. Уфа.  
ул. Нежинская д.11/1 офис 2.6, тел. (347)2420273  
E-mail: [mcc-work@mail.ru](mailto:mcc-work@mail.ru)

**Исполнительный директор: Ольга Брусникина**  
**Редактор: Константин Васильев**  
**Дизайнер: Александр Бухалов**

Перепечатка материалов из журнала возможна только с разрешения редакции. При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.  
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов.  
За содержание рекламы ответственность несет рекламодатель. Статьи приводятся в авторской редакции.

© ЗАО «Журнал «Монтажные и специальные работы в строительстве», 2016

Подписано в печать 26.10.2016 Формат 60x88 1/8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4.  
Зак. №1992 Типография «СМУК-ПРЕСС»  
г. Уфа, ул. Комсомольская, 122 б, тел (347) 237-15-28

## УЧРЕДИТЕЛИ:

**ЗАО «Трест Коксохиммонтаж»,**  
**ОАО «АК ВНЗМ»,**  
**ОАО «Волгонефтехиммонтаж»,**  
**ОАО «Трест № 7»,**  
**ЗАО «Кислородмонтаж»**

## СОДЕРЖАНИЕ

### Производственный опыт

*Опыт монтажа технологического оборудования спуспителя хвостов обогащения №1 Наталкинского горно-обогатительного комбината ..... 2*

### Наука - производству

*Аналитическая оценка деформативности мачты ..... 7*

### Гражданское строительство

*Ускорение решения жилищной проблемы в Северо-Западном и Уральском регионах путем создания кластеров индустриального домостроения на инновационной основе ..... 10*

*Иннополис – эталонный город ..... 14*

### Объекты заполярья

*Строительство военных объектов в Арктике ..... 17*

*Анализ процесса оттаивания многослойных оснований под отапливаемыми сооружениями с полами по грунту ..... 22*

### Строительные материалы

*Инъекционные и капсульные системы крепежа в экстремальных условиях ..... 24*

### Наша история

*Лигносульфаты.  
Современные технологии - наследие ученых СССР ..... 28*

## Дорогие читатели!

Подписаться на журнал можно отправив заявку на адрес электронной почты: [mcc-work@mail.ru](mailto:mcc-work@mail.ru)

Отправка журнала подписчикам осуществляется простыми или заказными письмами через Почту России.

**Получить ответы на вопросы, связанные с подпиской, вы можете по электронной почте или по телефону +7 (347) 2420273**

наш сайт в интернете:  
[www.montazhnie.ru](http://www.montazhnie.ru)  
или журналмонтажные.рф  
E-mail: [mcc-work@mail.ru](mailto:mcc-work@mail.ru)

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАТИВНОСТИ МАЧТЫ

М. Н. Кирсанов, д-р физ.-мат. наук, проф. НИУ МЭИ кафедра теор.механики и мехатроники.  
E-mail: mpei2004@yandex.ru

**Аннотация:** Получено точное решение задачи о деформации плоской модели мачты с треугольной решеткой под действием вертикальной и горизонтальной нагрузок при произвольном числе вертикальных панелей. Усилия в стержнях найдены методом вырезания узлов. При обобщении решения на произвольное число панелей использован метод индукции и операторы системы компьютерной математики Maple для составления и решения рекуррентных уравнений. Графики полученных зависимостей обнаруживают экстремальные точки, позволяющие оптимизировать расход материала и жесткость системы. Найдены некоторые предельные и асимптотические характеристики решения.

**Ключевые слова:** ферма, мачта, Maple, индукция, асимптотика, прогиб

**Аналитические решения для ферменных конструкций являются хорошим дополнением к точным численным расчетам, выполненным в специализированных пакетах, в том числе с применением метода конечных элементов. С одной стороны такие решения могут служить простыми тестовыми оценками, с другой — они позволяют выявить особенности рассчитываемой конструкции, недоступные или трудно уловимые в численном анализе. Среди аналитических решений наиболее сложными являются решения, в которых имеется зависимость не только от размеров фермы и нагрузок, но и от числа панелей или стержней. Современные системы компьютерной математики (Maple, Mathematica, Maxima и др.) позволяют составлять и решать уравнения равновесия в символьной форме. Однако получить зависимость прогиба или усилия в каком-либо стержне от числа панелей можно только индуктивным методом для регулярных конструкций, сложность которых характеризуется одним или несколькими натуральными числами. Ниже приведен алгоритм получения точного решения для деформаций верхушки мачты с произвольным числом панелей.**

## Расчет

Для определения усилий в стержнях воспользуемся программой [1], написанной на языке системы компьютерной математики Maple и позволяющей получать решения в символьной форме.

Задаем координаты узлов боковых стоек мачты:

$$x_i = a, y_i = (i-1)h$$

$$x_{i+n+1} = 0, y_{i+n+1} = y_i$$

$$i = 1, \dots, n+1$$

Координаты загруженной вершины:

$$x_{2n+3} = a/2, y_{2n+3} = h(n+1/2)$$

начало координат в левой неподвижной опоре.

Нумерация шарниров идет снизу вверх, сначала правая стойка, затем левая.

Структура соединений узлов и стержней задается набором условно ориентированных векторов

$$\vec{R}_i = [R_{i,1}, R_{i,2}]$$

Здесь первая координата – номер одного конца стержня, вторая – другого конца. Какой шарнир выбирать за начало, какой за конец значения на решение не имеет.

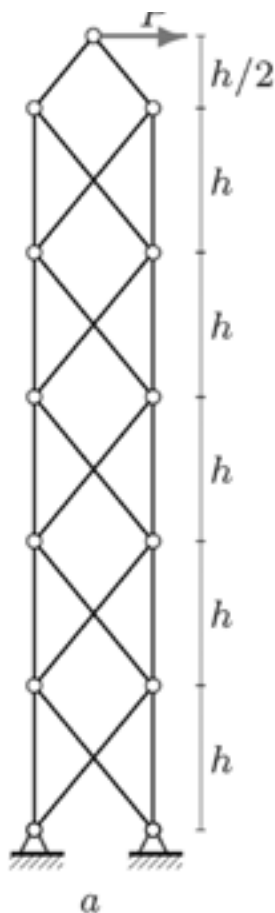


Рис. 1

Имеем следующие векторы:

$$[i, i+1]$$

$$[i+n+1, i+n+2]$$

$$[i, i+n+2]$$

$$[i+1, i+n+1]$$

$$\text{где } i = 1, \dots, n.$$

Векторы стержней вершины мачты:

$$[2n+3, n+1]$$

$$[2n+3, 2n+2]$$

Опоры моделируются двумя стержнями – вертикальным и горизонтальным, таким образом в конструкции четыре опорных стержня. Матрица уравнений равновесия в методе вырезания узлов составляется в цикле по числу стержней фермы  $m = 2n + 7$  и имеет следующие элементы:

$$G_{2R_{j,2}-1,j} = (x_{R_{j,1}} - x_{R_{j,2}}) / l_j$$

$$G_{2R_{j,2},j} = (y_{R_{j,1}} - y_{R_{j,2}}) / l_j$$

$$G_{2R_{j,1}-1,j} = -(x_{R_{j,1}} - x_{R_{j,2}}) / l_j$$

$$G_{2R_{j,1},j} = -(y_{R_{j,1}} - y_{R_{j,2}}) / l_j$$

где  $l_j$  – длина стержня,  $j = 1, \dots, m$

Систему уравнений равновесия записываем в матричном виде

$$\{G\}\vec{S} = \vec{B}, \quad (1)$$

где  $\vec{S} = [S_1, S_2, \dots, S_m]$  – вектор неизвестных усилий (включая опорные),  $\vec{B}$  – вектор нагрузок (нечетные элементы – горизонтальные усилия, четные – вертикальные).

Смещение вершины мачты (узла с номером  $2n+3$ ) определим по формуле Максвелла-Мора

$$EF\Delta_n = P \sum_{i=1}^{2n} S_i^2 l_i + \gamma \sum_{i=2n+1}^{m-4} S_i^2 l_i, \quad (2)$$

где  $EF$  – жесткость стержней стоек,  $EF/\gamma$  – жесткость стержней решетки ( $\gamma$  – безразмерный коэффициент, обычно эти стержни менее жесткие и принимается  $\gamma \geq 1$ ),  $S_i$  – усилия в стержнях от действия горизонтальной единичной силы, приложенной к вершине. Верхний предел суммирования равен  $m-4$ , так как в число деформируемых стержней четыре стержня, моделирующие опоры, не входят.

## Индукция

Обобщение решения на произвольное число панелей проведем методом индукции. Ранее этим же методом были получены формулы для прогиба вантовой системы [2], пространственных [3-6] и плоских [7-10] ферм. Расчет производим для  $n=1, \dots, 8$ . Решение для каждой фермы с  $n$  панелями в символьной моде системы компьютерной математики Maple принимает один и тот же вид:

$$\Delta'_n = (C_n \gamma (a^2 + h^2)^{3/2} + H_n^{(cop)} h^3) / (4a^2), \quad (3)$$

где введено обозначение  $\Delta'_n = EF\Delta_n / P$ .

В результате вычислений получаем для коэффициентов и последовательности, общие члены которых определяем с помощью специального пакета genfunc системы Maple. Сначала оператор rfg\_findrecur возвращает рекуррентное уравнение для искомого коэффициента, затем оператор rsolve дает искомые решения:

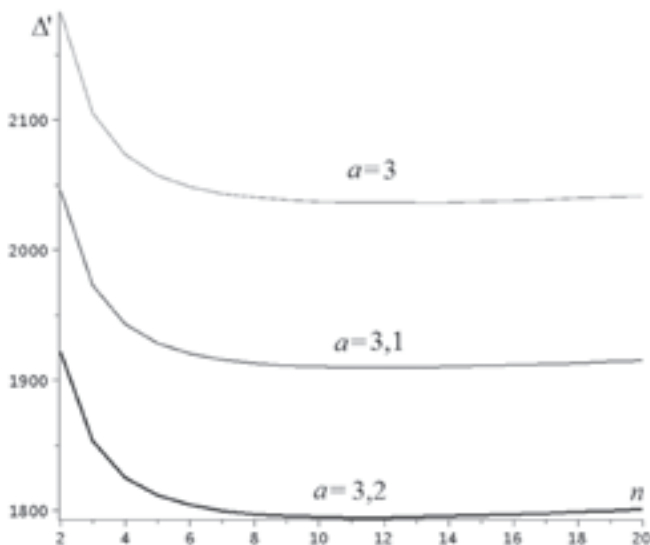


Рис. 2 Горизонтальное смещение

$$C_n = 2n + 1, \quad H_n^{(cop)} = 4n(n+1)(2n+1)/3.$$

Аналогично находим вертикальный прогиб вершины мачты от действия вертикальной нагрузки:

$$\Delta''_n = (C_n \gamma (a^2 + h^2)^{3/2} + H_n^{(верт)} h^3) / (4h^2), \quad (4)$$

где  $H_n^{(верт)} = 2(1 + 2n - (-1)^n)$ ,  $\Delta''_n = EF\Delta_n / P$ .

Коэффициенты  $C_n$  в обоих решениях совпадают.

## Анализ

В задаче о выборе оптимального числа панелей необходимо зафиксировать высоту сооружения. Пусть для примера  $H = h(n+1/2) = 30$  м. На рисунке 2 даны кривые относительного прогиба в зависимости от числа панелей при различных размерах  $a$  (в метрах) при  $\gamma=1$ . Наблюдается слабо выраженный минимум. При этом, экстремальное число панелей почти не зависит от размера  $a$ . Аналитическая форма полученного решения позволяет средствами Maple выявить предельные свойства конструкции. Вычисление предела показывает, что найденная функция имеет асимптоту с углом наклона  $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta'_n / n = a\gamma / 2$ .

Рассматривая решение (4), замечаем, что кривые зависимости вертикального смещения от действия вертикальной нагрузки в вершине (рис. 3) имеют ломаный характер. Это объясняется наличием «мигающего» слагаемого  $(-1)^n$  в решении (4), имеющего только локальные экстремумы.

При увеличении числа панелей прогиб в этой постановке, очевидно, растет нелинейно. Кубический характер полученной зависимости выявляет следующий предел:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta''_n / n = a^3 \gamma / (2H^2).$$

Как и в задаче о горизонтальном смещении существенную роль здесь играет коэффициент перераспределения материала  $\gamma$ .

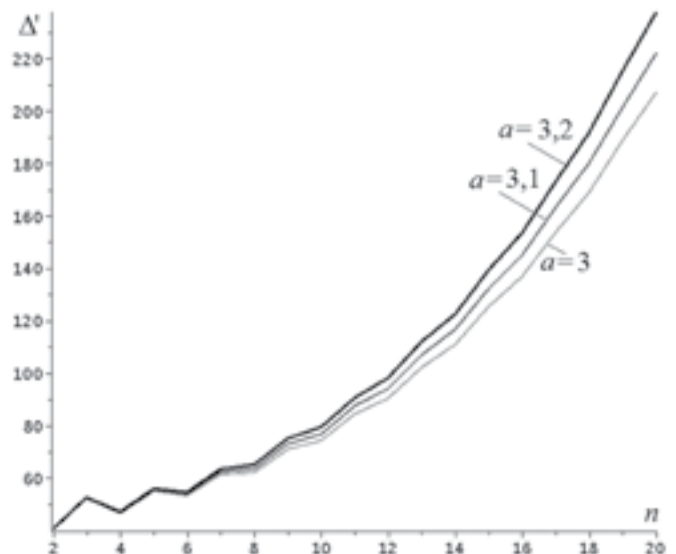


Рис. 3 Вертикальное смещение

## Выводы

Полученные аналитические решения, несмотря на достаточную общность постановки, оказались сравнительно просты по форме, просты в применении и, в отличие от численных методов, позволяют получать значения прогиба при любом числе панелей. Это делает найденное решение применимым к особо сложным системам рассматриваемой структуры, дает возможность оптимизировать проектируемые конструкции и оценивать работоспособность эксплуатируемых сооружений. Обзор аналитических решений, полученных методом индукции, можно найти в [11-13].

## Литература:

1. Кирсанов М. Н. Maple и Maplet. Решение задач механики. — СПб.: Изд-во Лань, 2012. — 512 с.
2. Кирсанов М.Н. Статический расчет вантовой системы//Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 1. № 3. С. 89-93.
3. Кирсанов М.Н. Статический расчет и анализ пространственной стержневой системы//Инженерно-строительный журнал. 2011. № 6. С. 28-34.
4. Кирсанов М.Н. Аналитический расчет пространственной стержневой регулярной структуры с плоской гранью//Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 2 (259). С. 2-6.
5. Кирсанов М.Н. Анализ прогиба фермы прямоугольного пространственного покрытия//Инженерно-строительный журнал. 2015. № 1 (53). С. 32-38.
6. Кирсанов М.Н., Андреевская Т.М. Анализ влияния упругих деформаций мачты на позиционирование антенного и радиолокационного оборудования // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5 (40). С. 52-58.
7. Кирсанов М.Н. Генетический алгоритм оптимизации стержневых систем//Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 2. С. 60-63.
8. Dong X., Kirsanov M.N. The dependence of the deflection of the truss from the position of the load for an arbitrary number of panels//Вестник научных конференций. 2016. № 1-4 (5). С. 6-7.
9. Jiang H., Kirsanov M.N. An analytical expression for the influence line of the truss//Вестник научных конференций. 2016. № 1-5 (5). С. 10-11.
10. Al-Shahrabi A.M., Kirsanov M.N. Line of influence of the deflection for cantilever truss//Вестник научных конференций. 2016. № 2-1 (6). С. 6-7.
11. Тиньков Д.В. Анализ точных решений прогиба регулярных шарнирно-стержневых конструкций// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. №6. С. 21-28.
12. Тиньков Д.В. Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2015. №5(57). С. 66-73.
13. Кийко Л.К. Аналитическая оценка прогиба арочной фермы под действием ветровой нагрузки // Научный вестник. 2016. № 1 (7). С. 247-254.

# Уважаемые читатели!

**Если Вы обладаете знаниями и опытом, которыми можете дополнить заинтересовавшие Вас материалы журнала, то предлагаем Вам поделиться ими.**

*При этом не опасайтесь раскрыть свои фирменные секреты, делать это вовсе не обязательно. Вполне достаточно показать общий механизм работы, и продемонстрировать свои возможности.*

**Станьте автором статей – возможно, этим Вы расширите свой круг единомышленников.**

*Ждем Ваших писем на адрес электронной почты **mcc-work@mail.ru**. Мы с удовольствием ведём в переписку с авторами*

С уважением,  
редакция журнала

**МОНТАЖНЫЕ  
И СПЕЦИАЛЬНЫЕ  
РАБОТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

