

11. Zub, I. V., Ju. E. Ezhov, and D. A. Filippova. "Transport terminal as ecological safety regulation object." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova: sbornik nauchnyh statej*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 123–130.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зуб Игорь Васильевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_texp@gumrf.ru*  
*Ежов Юрий Евгеньевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*ezhovye@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Zub Igor Vasilevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*kaf\_texp@gumrf.ru*  
*Ezhov Yyri Evgenevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
*ezhovye@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 5 сентября 2016 г.*

**DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-61-68**  
**УДК 624.3**

**М. Н. Кирсанов**

### СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОНТАЖНАЯ СХЕМА ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ

*Предлагается статически определяемая схема плоской фермы решетчатого типа с четырьмя внешними связями, моделируемыми симметрично расположенными опорными жесткими стержнями. Ставится задача определения прогиба конструкции в зависимости от числа панелей, размеров фермы и величины нагрузки, приложенной равномерным образом к узлам верхнего пояса. Усилия в стержнях определяются методом вырезания узлов. В цикле по числу стержней составляется матрица системы уравнений равновесия всех шарниров конструкции. Методом индукции по числу панелей с применением специальных операторов *rgf\_findrecur* и *rsolve* из пакета *Genfunc* системы компьютерной математики *Maple* получена точная формула для прогиба среднего узла нижнего пояса фермы в виде полинома четвертого порядка. Для последовательности коэффициентов формулы выводятся и решаются рекуррентные уравнения восьмого порядка. Кривые зависимости прогиба от числа панелей при фиксированной суммарной нагрузке и длине пролета обнаруживают резкие скачки и горизонтальную асимптоту, зависящую от высоты фермы и соотношения жесткостей стержней поясов и решетки. Обнаружена кинематическая изменяемость фермы при нечетном числе панелей, приводящая к равенству нулю определителя системы уравнений узлов. Построена непротиворечивая схема возможных скоростей изменяемой конструкции и найдены соотношения между скоростями узлов. С целью недопущения изгибных деформаций предлагается метод проектирования монтажа фермы с учетом размещения стержней фермы в отдельных плоскостях. Задача о последовательности крепления стержней в узлах сводится к решению задачи дискретной математики о реберной раскраске графа. Применяются операторы *Graph* и *EdgeChromaticNumber* пакета *GraphTheory* системы *Maple*. Приводится конкретный пример монтажа.*

*Ключевые слова:* ферма, прогиб, аналитическое решение, *Maple*, индукция, реберная раскраска.

#### Введение

Ферма — неотъемлемый элемент конструкций портовых складов, гидротехнических сооружений, портовых кранов, мостов и корпусов кораблей [1] – [4]. Легкие и прочные, сравнительно недорогие и удобные в монтаже, они широко распространены как в строительных, так и судовых конструкциях. Существует множество численных расчетов и специализированных программ

(в том числе метод конечных элементов), предназначенных для определения усилий в стержнях фермы и прогиба под действием различных нагрузок [5] – [10]. Для повышения надежности и достоверности таких расчетов весьма актуальны простые тестовые аналитические решения. В настоящей работе предлагается схема статически определимой конструкции и ее аналитический расчет. Ставится цель получить точное решение для напряженно-деформированного состояния фермы в зависимости от величины нагрузки, геометрических параметров и числа панелей. Обзор аналитических решений плоских ферм содержится в работах [11] – [13].

### Расчетная схема

Ферма, содержащая  $n$  панелей в половине пролета, состоит из  $m = 4n + 4$  стержней вместе с четырьмя опорными, соединенных  $2n + 2$  шарнирами (рис. 1). Опорные стержни примем жесткими. Конструкция статически определимая. Система уравнений равновесия (по два уравнения в проекциях для каждого узла) состоит из  $m$  уравнений для  $m$  неизвестных усилий в стержнях. Для расчета используем алгоритм [14] составления уравнений равновесия узлов в символьной форме на языке системы компьютерной математики Maple [14], [15].

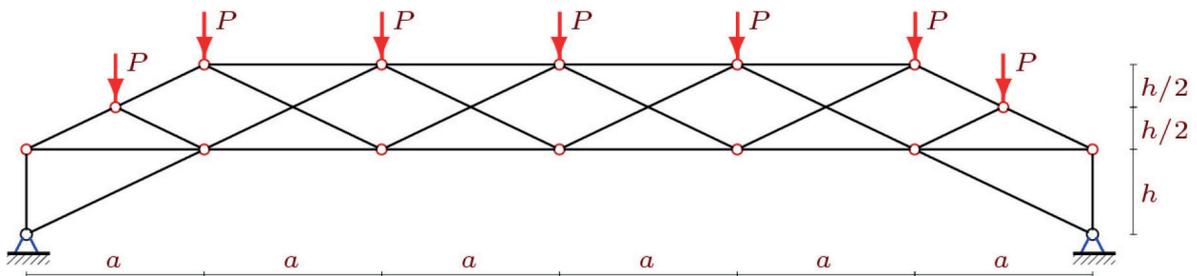


Рис. 1. Нагружение верхнего пояса фермы при  $n = 6$

Пронумеруем шарниры фермы слева направо сначала по нижнему, затем по верхнему поясу (рис. 2). Выберем начало координат в левой неподвижной опоре и введем в программу системы Maple координаты узлов:

$$\begin{aligned} x_i &= ai - a, y_i = 0, i = 1, \dots, n + 1; \\ x_{i+n+2} &= ai, y_{i+n+2} = h, i = 1, \dots, n - 1; \\ x_{n+2} &= a / 2, y_{n+2} = h / 2; \\ x_{2n+2} &= na - a / 2, y_{2n+2} = h / 2; \\ x_{2n+3} &= 0, y_{2n+3} = -h; \\ x_{2n+4} &= na, y_{2n+4} = -h. \end{aligned}$$

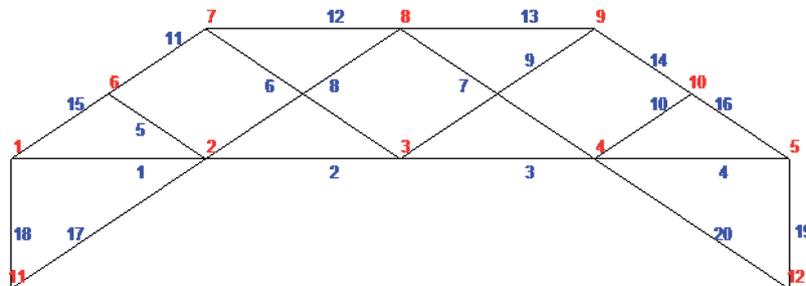


Рис. 2. Номера узлов и стержней при  $n = 4$

Структуру решетки фермы введем конфигурационными векторами  $\bar{V}_i, i = 1, \dots, m$ . Первая компонента этих векторов — номер шарнира фермы в условном начале этого вектора, вторая —

номер шарнира в его конце. Выбор направления векторов, определяющих структуру соединений стержней фермы, произволен и никак не связан с величинами усилий.

Для стержней нижнего и верхнего пояса имеем следующие векторы:  $\bar{V}_i = [i, i + 1]$ ,  $\bar{V}_{i+3n-2} = [i + n + 1, i + n + 2]$ ,  $i = 1, \dots, n$ ; стержни решетки:  $\bar{V}_{i+n} = [i + 1, i + n + 1]$ ,  $\bar{V}_{i+2n-1} = [i + 1, i + n + 3]$ ,  $i = 1, \dots, n - 1$ ,  $\bar{V}_{4n-1} = [1, n + 2]$ ,  $\bar{V}_{4n} = [n + 1, 2n + 2]$ . Стержни опор моделируются векторами  $\bar{V}_{m-3} = [2, 2n + 3]$ ,  $\bar{V}_{m-2} = [1, 2n + 3]$ ,  $\bar{V}_{m-1} = [n + 1, 2n + 4]$ ,  $\bar{V}_m = [n, 2n + 4]$ . Первый индекс в номере  $V_{j,i}$  принимает значения 1 или 2 и соответствует номеру компоненты вектора  $\bar{V}_i$ , второй — номер стержня. Элементы матрицы системы уравнений равновесия узлов **G** имеют следующий вид:

$$G_{q,i} = -l_{j,i} / l_i, \quad q = 2V_{i,2} - 2 + j, \quad q \leq m, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, \dots, m;$$

$$G_{r,i} = l_{j,i} / l_i, \quad r = 2V_{i,1} - 2 + j, \quad r \leq m, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, \dots, m,$$

где  $l_i = \sqrt{l_{1,i}^2 + l_{2,i}^2}$ ;  $l_{1,i} = x_{V_{2,i}} - x_{V_{1,i}}$ ;  $l_{2,i} = y_{V_{2,i}} - y_{V_{1,i}}$ ;  $i = 1, \dots, m$ .

Задача определения усилий в стержнях фермы сводится к решению системы линейных уравнений, которую запишем в матричной форме:

$$\mathbf{G}\bar{S} = \bar{B},$$

где  $\bar{B}$  — вектор нагрузок длиной  $m$ ;  $\bar{S}$  — вектор неизвестных усилий;  $B_{2i} = 1$ ,  $i = n + 2, \dots, 2n + 2$  — для случая нагружения по верхнему поясу (остальные элементы вектора правой части равны нулю) и  $B_{2(k+1)} = 1$  — при определении усилий в стержнях от действия сосредоточенной нагрузки, приложенной к среднему узлу нижнего пояса. Принято четное число панелей,  $k = 2n$ . Прогиб фермы в упругой стадии работы определяем по формуле Максвелла–Мора:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{m-4} \frac{S_i \tilde{s}_i l_i}{EF_i}, \quad (1)$$

где  $S_i$  — усилие в стержне  $i$  от действия внешней нагрузки;  $\tilde{s}_i$  — усилие в стержне  $i$  от действия единичной вертикальной силы в середине пролета нижнего пояса;  $E$  — модуль упругости;  $F_i = F_0$  — площадь сечений стержней верхнего и нижнего пояса длиной  $a$ ;  $F_i = F_0 / \gamma$  — площадь сечений стержней решетки длиной  $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ . Если последовательно рассчитывать прогиб в фермах с различным числом панелей ( $n = 1, \dots, 16$ ), то можно заметить, что результирующая формула будет иметь всякий раз один и тот же вид:

$$\Delta = \frac{P}{EF_0 h^2} (A_k a^3 + C_k c^3 \gamma).$$

Для получения общей формулы остается только найти закономерность образования коэффициентов  $A_k$  и  $C_k$ . С помощью оператора **rgf\_findrecur** из пакета **genfunc** системы **Maple** для последовательности 0, 3, 2, 22, 16, 73, 58, 172, 144, 335, 290, 578, 512, 917, 826, 1368 коэффициентов при  $a^3$  (оператор **rgf\_findrecur** требует четное число элементов) получаем рекуррентное уравнение

$$A_k = A_{k-1} + 3A_{k-2} - 3A_{k-3} - 3A_{k-4} + 3A_{k-5} + A_{k-6} - A_{k-7}.$$

Решение этого уравнения (общий член последовательности) находим с помощью оператора **rsolve**

$$A_k = (4k^3 + 9((-1)^k - 1)k^2 + (17 - 15(-1)^k)k + 9((-1)^k - 1)) / 12.$$

Аналогично получаем и другой коэффициент

$$C_k = (2k + (-1)^k - 1) / 4.$$

### Числовой пример. Анализ

Рассмотрим ферму заданного пролета  $L = 2ka = 40$  м с решеткой из стержней, площадь сечений которых в два раза меньше площади сечений поясов:  $\gamma = 2$ . Пусть суммарная нагрузка  $P_s$

на ферму не меняется при изменении числа панелей:  $P_s = (2k+1)P$ , а длина пролета определяет размер панели  $a = L/(2k)$ . Кривые зависимости относительной величины прогиба  $\Delta' = \Delta EF / P_s$  от числа панелей для различных высот фермы отображены на рис. 3.

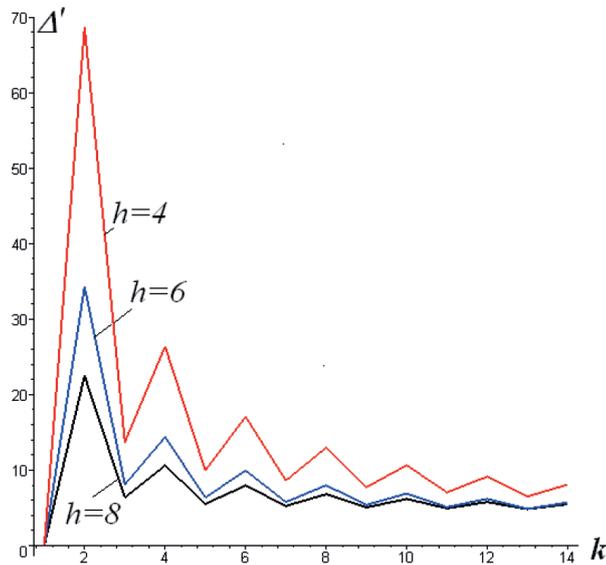


Рис. 3. Зависимость прогиба от числа панелей

Полученная зависимость обнаруживает резкие скачки, свидетельствующие о чувствительности конструкции к четности числа  $k$  панелей в половине пролета. Очевидно также, что кривые при больших  $k$  выходят на горизонтальную асимптоту. Аналитическая форма решения позволяет найти предел:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta' = h^3 / 4$ .

#### Анализ кинематической изменяемости

Первоначальный выбор четного числа панелей был обусловлен желанием иметь центральную точку в пролете, в которой можно было бы объективно измерить прогиб. При нечетном числе панелей такой точки нет, и расчет не был произведен. Но если взять нечетное число панелей  $n = 2k - 1$  и вместо центральной точки попытаться определить прогиб в какой-либо другой точке, то оказывается, что задача не имеет решения, и это связано не с выбором контрольной точки и видом внешней нагрузки, а с вырождением системы уравнений равновесия. В численном анализе этот факт иногда ускользает из поля зрения исследователя, скрывшись за ошибками округления и погрешностями вычислений. В аналитическом же варианте решения результат очевиден — определитель системы становится равным нулю. Ранее такие эффекты были обнаружены в плоских [16] – [18] и пространственных фермах [19]. Для надежного подтверждения кинематической изменяемости фермы с нечетным числом панелей в пролете необходимо привести схему возможных скоростей. Такая схема для трех панелей дана на рис. 4.

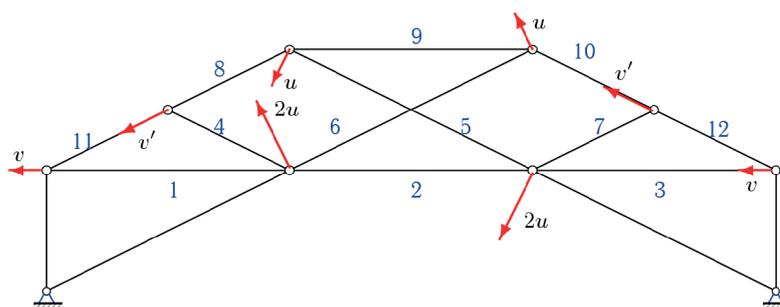


Рис. 4. Виртуальные скорости изменяемой фермы,  $n = 3$

Стержни 1 и 3 нижнего пояса совершают вращательные движения вокруг соответствующих опор, остальные стержни движутся вокруг мгновенных центров скоростей. Получившаяся картина распределения скоростей кинематически непротиворечива, механизм имеет одну степень свободы. Все скорости могут быть выражены через одну величину, например, скорость узла 1  $v$ . Рассматривая положения мгновенных центров скоростей, можно получить, что виртуальные скорости связаны кинематическими соотношениями:  $u = vc / (2h)$ ,  $4hv' = v\sqrt{a^2 + 9h^2}$ . Направление скоростей указано схематично. В действительности вектор скорости  $v'$  направлен не по стержню, а весьма близок к нему, что легко проследить по расположению мгновенных центров скоростей элементов. Таким образом, рассмотренная схема фермы имеет весьма коварное свойство — при одних числах панелей это вполне работоспособная конструкция, при других — мгновенно изменяемый механизм. Второй факт можно не заметить, если ферма имеет вместо шарнирных узлов жесткие связи (сварка), и вся конструкция держится только на этих дополнительных связях, имея при этом врожденное опасное свойство кинематической изменяемости.

### Монтажная схема

Практическое исполнение схемы фермы с перекрещивающимися раскосами не очевидно. Возникает вопрос, как монтировать стержни, чтобы избежать их изгиба? Вполне возможно, что при больших длинах стержней небольшой изгиб стержня не сильно скажется на работоспособности конструкции. Но лучше, конечно, этого не допускать, тем более, что всегда можно расположить стержни в разных (параллельных) плоскостях. Фактически, это задача о реберной раскраске графа, при которой ребрам графа ставятся в соответствие натуральные числа (цвета) так, чтобы одной вершине графа (узлу фермы) были инцидентны ребра разных цветов [20]. В данном случае цвета — это условный уровень плоскости, в которой монтируется стержень.

В системе Maple есть специальный оператор `EdgeChromaticNumber` из пакета `GraphTheory`, решающий эту задачу. Приведем это решение на примере фермы с  $n = 4$  (см. рис. 2). Сначала оператор `Graph` задает граф фермы: `G:=Graph(undirected, {{1, 2}, {2, 3}, {3, 4}, {4, 5}, {5, 10}, {10, 9}, {9, 8}, {8, 7}, {7, 6}, {6, 1}, {6, 2}, {2, 8}, {8, 4}, {4, 10}, {7, 3}, {3, 9}})`. Затем оператор `EdgeChromaticNumber(G,'col')` возвращает в переменную `'col'` набор ребер одного цвета: `[{{2, 8}, {3, 9}, {4, 10}}, {{2, 6}, {3, 7}, {4, 8}}, {{1, 6}, {2, 3}, {4, 5}, {7, 8}, {9, 10}}, {{1, 2}, {3, 4}, {5, 10}, {6, 7}, {8, 9}}` и хроматический индекс 4. Это означает, что в списке четыре группы пар вершин ребер одного цвета (одного уровня плоскости при монтаже). Уровень 1 (низший), например, состоит из стержней с вершинами {2, 8}, {3, 9} и {4, 10} (рис. 2, 5), уровень 2 также из трех стержней, а уровень 3 — из пяти.

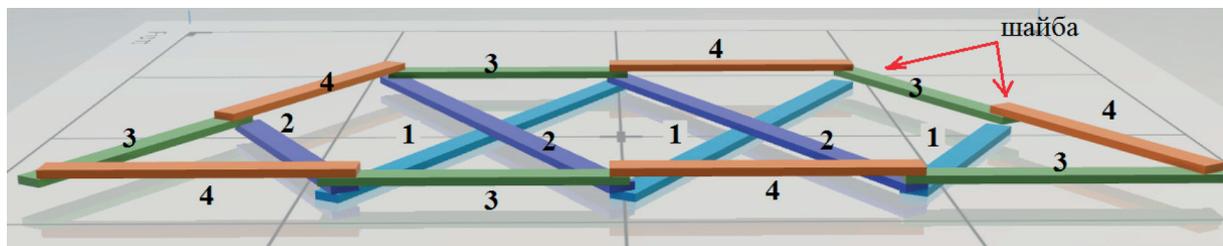


Рис. 5. Реберная раскраска и монтажная схема фермы,  $n = 4$

При этом выясняется, что в узлах 9 и 10 (см. рис. 2, 5) между стержнями образуются промежутки по высоте, требующие дополнительных шайб с толщиной, равной толщине стержня. Очевидно, эффективность предлагаемого автоматического составления монтажной схемы растет с увеличением числа панелей, где вручную назначить порядок сборки узлов представляется практически невыполнимой задачей.

## Выводы

Предложена схема статически определимой фермы. Методом индукции получена точная формула для расчета прогиба в зависимости от числа панелей. Символьная математика позволила выявить опасную особенность схемы — кинематическую изменяемость конструкции при нечетном числе панелей. Для большого числа панелей две фермы, отличающиеся друг от друга при равном пролете на одну панель, на первый взгляд, могут показаться принципиально идентичными. Однако это не так: одна схема — это конструкция, другая — механизм. Обнаружить кинематическую изменяемость, руководствуясь традиционными в строительной механике методами, здесь трудно. Приведенная схема виртуальных скоростей подтверждает вывод о влиянии четности числа панелей на работу конструкции. Впервые с использованием теории графов предложен алгоритм планирования монтажа конструкции для безмоментной работы стержней. Алгоритм легко программируется и хорошо вписывается в уже существующую программу расчета усилий в стержнях. Приведенный пример показал, что допускается решение этой задачи, при котором в конструкцию для корректировки между некоторыми стержнями необходимо добавлять пассивные шайбы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подобед В. А.* Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны / В. А. Подобед // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 318–331.
2. *Панасенко Н. Н.* Дискретно-континуальная модель пространственных металлоконструкций грузоподъемных кранов / Н. Н. Панасенко, А. В. Синельщиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2006. — № 1. — С. 184–193.
3. *Arena A.* Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification / A. Arena, A. Casalotti, W. Lacarbonara, M. P. Cartmell // International Journal of Mechanical Sciences. — 2015. — Vol. 93. — Pp. 8–21. DOI: 10.1016/j.jimecs.2014.11.024.
4. *Kopnov V. A.* Fatigue life prediction of the metalwork of a travelling gantry crane / V. A. Kopnov // Engineering Failure Analysis. — 1999. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 131–141. DOI: 10.1016/S1350-6307(98)00041-7.
5. *Heyman J.* Design of a simple steel truss / J. Heyman // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings. — 2010. — Vol. 163. — Is. 1. — Pp. 53–56. DOI: 10.1680/stbu.2009.163.1.53.
6. *Hutchinson R. G.* The structural performance of the periodic truss / R. G. Hutchinson, N. A. Fleck // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2006. — Vol. 54. — Is. 4. — Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008.
7. *Алпатов В. Ю.* Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций / В. Ю. Алпатов, И. С. Холопов // Металлические конструкции. — 2009. — Т. 15. — № 1. — С. 47–57.
8. *Camp C. V.* Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization / C. V. Camp, M. Farshchin // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 62–63. — Pp. 87–97. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.020.
9. *Kaveh A.* Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach / A. Kaveh, M. Shahrrouzi // Engineering Computations. — 2008. — Vol. 25. — Is. 3. — Pp. 268–288. DOI: 10.1108/02644400810857092.
10. *Sonmez M.* Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures / M. Sonmez // Applied Soft Computing. — 2011. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 2406–2418. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.09.003.
11. *Тиньков Д. В.* Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций / Д. В. Тиньков // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 5 (57). — С. 66–73. DOI: 10.5862/MSE.57.6.
12. *Тиньков Д. В.* Анализ точных решений прогиба регулярных шарнирно-стержневых конструкций / Д. В. Тиньков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2015. — № 6. — С. 21–28.
13. *Кийко Л. К.* Аналитическая оценка прогиба арочной фермы под действием ветровой нагрузки / Л. К. Кийко // Научный вестник. — 2016. — № 1 (7). — С. 247–254.
14. *Кирсанов М. Н.* Maple и Maplet. Решения задач механики / М. Н. Кирсанов. — СПб.: Лань, 2012. — 512 с.

15. *Голоскоков Д. П.* Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: ПаркКом, 2010. — 644 с.
16. *Кирсанов М. Н.* Расчет жесткости стержневой решетки / М. Н. Кирсанов // Вестник машиностроения. — 2015. — № 8. — С. 48–51.
17. *Кирсанов М. Н.* Анализ прогиба решетчатой балочной фермы распорного типа / М. Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 5 (57). — С. 58–65. DOI: 10.5862/MCE.57.5.
18. *Кирсанов М. Н.* Аналитический расчет балочной фермы со сложной решеткой / М. Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2015. — № 3 (260). — С. 7–12.
19. *Кирсанов М. Н.* Расчет пространственной стержневой системы, допускающей мгновенную изменяемость / М. Н. Кирсанов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2012. — № 3. — С. 48–51.
20. *Andersen L. D.* On edge-colourings of graphs / L. D. Andersen // *Mathematica Scandinavica*. — 1977. — Vol. 40. — No. 2. — Pp. 161–175.

## STATIC ANALYSIS AND MOUNTING DIAGRAM OF FLAT TRUSS

*The statically determinate scheme of flat lattice-type truss with four external connections that are modeled by the symmetrically arranged supporting rigid rods is proposed. The problem of finding the deflection of the structure depending on the number of panels, size of truss and amount of load applied in a uniform manner to the nodes of the upper belt is solved. The forces in the rods are determined by cutting out the knots. In the cycle according to the number of rods arranged the matrix of the system of equilibrium equations of all joints of the structure. By induction on the number of panels with the use of special operators `rgf_findrecur` and `rsolve` package `genfunc` the computer algebra system Maple we have obtained exact formula for the deflection of the middle node of the lower chord in the form of a polynomial of the fourth order. For the sequence of the coefficients of the formulae are derived and solved the recurrence equation of the eighth order. Curves of deflection by the number of panels at a fixed total load and the length of the passage detect sharp form and horizontal asymptote, depending on the height of the truss and the ratio of the stiffness of the rods of the belts and lattice. the kinematic variability of the truss with odd number of panels, leading to the equality to zero of the determinant of The system of equations of the nodes was discovered. The consistent scheme of possible speeds variable and the ratio between the speeds of the nodes are obtained. To prevent the Flexural deformation the method of installation of rods in the truss based on the location of the rods in separate planes is proposed. The problem of the sequence of attachment of the rods at the nodes is reduced to the solution of a problem of discrete mathematics on edge-coloring of the graph. Apply operators `EdgeChromaticNumber` and `Graph` from `GraphTheory` package of Maple. The example of installation is given.*

*Keywords: truss, deflection, analytical solution, Maple, induction, edge-coloring.*

## REFERENCES

1. Podobed, V. A. “Mathematical modelling of wind load on port bridge cranes.” *Vestnik of MSTU* 9.2 (2006): 318–331.
2. Panasenko, N. N., and A. V. Sinelshchikov. “Discrete-continuum model of spatial metalwear of climbing cranes.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1 (2006): 184–193.
3. Arena, A., A. Casalotti, W. Lacarbonara, and M. P. Cartmell. “Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification.” *International Journal of Mechanical Sciences* 93 (2015): 8–21. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.11.024.
4. Kopnov, V. A. “Fatigue life prediction of the metalwork of a travelling gantry crane.” *Engineering Failure Analysis* 6.3 (1999): 131–141. DOI: 10.1016/S1350-6307(98)00041-7.
5. Heyman, J. “Design of a simple steel truss.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 163.1 (2010): 53–56. DOI: 10.1680/stbu.2009.163.1.53.
6. Hutchinson, R. G., and N. A. Fleck. “The structural performance of the periodic truss.” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 54.4 (2006): 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008.
7. Alpatov, V. Yu., and I. S. Kholopov. “Geometrical form optimization of a spatially-rod structures.” *Metal Constructions* 15.1 (2009): 47–57.
8. Camp, C. V., and M. Farshchin. “Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization.” *Engineering Structures* 62–63 (2014): 87–97. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.020.

9. Kaveh, A., and M. Shahrouzi. "Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach." *Engineering Computations* 25.3 (2008): 268–288. DOI: 10.1108/02644400810857092.
10. Sonmez, M. "Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures." *Applied Soft Computing* 11.2 (2011): 2406–2418. DOI: 10.1016/j.asoc. 2010.09.003.
11. Tinkov, D. V. "Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection." *Magazine of Civil Engineering* 5(57) (2015): 66–73. DOI: 10.5862/MCE.57.6.
12. Tinkov, D. V. "The analysis of nice calculations for displacements of regular joint-and-rod structures." *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 6 (2015): 21–28.
13. Kiyko, Larisa Konstantinovna. "Analytical evaluation of deflection of arched trusses under the action of wind loads." *Science Bulletin* 1(7) (2016): 247–254.
14. Kirsanov, M. N. *Maple i Maple. Resheniya zadach mekhaniki*. SPb.: Izd-vo Lan, 2012.
15. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoy fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
16. Kirsanov, M. N. "The calculation of the stiffness of the rod grille." *Russian Engineering Research* 8 (2015): 48–51.
17. Kirsanov, M. N. "Analysis of the deflection of a strut-type lattice girder truss." *Magazine of Civil Engineering* 5(57) (2015): 58–65. DOI: 10.5862/MCE.57.5.
18. Kirsanov, M. N. "Analytical calculation of beamed truss with complex lattice." *Structural Mechanics and Analysis of Constructions* 3(260) (2015): 7–12.
19. Kirsanov, M. N. "Calculation of spatial bar system that permits variability of instantly." *Structural Mechanics and Analysis of Constructions* 3 (2012): 48–51.
20. Andersen, L. D. "On edge-colourings of graphs." *Mathematica Scandinavica* 40.2 (1977): 161–175.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирсанов Михаил Николаевич —  
доктор физико-математических наук, профессор.  
Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
C216@Ya.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirsanov Mikhail Nikolayevich —  
Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor.  
National Research University "MPEI"  
C216@Ya.ru

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-68-75  
УДК 81-112.2

Е. В. Наденна

### ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КОММУНИКАТИВНЫХ УМЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ СУДОВОДИТЕЛЕЙ

В статье рассмотрена проблема формирования коммуникативных умений современных судоводителей на основе таких методов, как описание, эксперимент, сравнение, моделирование. Языковым материалом является английская морская стандартная фразеология радиообмена, содержащая специальную терминологию и многочисленные клише без их реального лексического наполнения, что затрудняет процесс запоминания и использования в речевой ситуации профессионального общения. Обучение терминологии связано с серьезными трудностями из-за отсутствия разработанных методических основ подачи студентам терминологической лексики по их специальности. Представлен опыт моделирования образовательной среды, применения в учебном процессе мультимедийного обучающего модуля «Стандартные фразы», обеспечивающего работу зрительной, слуховой и моторной памяти при запоминании специальной терминологии, а также апробирования комплекса упражнений при выполнении аудиторных практических работ, обеспечивающего развитие долговременной памяти студентов-судоводителей. Алгоритмы работы с разделами «Справочник» и «Тестирование» модуля «Стандартные фразы» помогают организовать работу по формированию лексических знаний в области английского морского языка и приобретению практических речевых навыков. Сделан вывод о том, что специфическая образовательная среда, систематическое вне-