

Оптимизация прожекторной мачты в виде трехгранной решетчатой башни

Л.Ш. Ахтямова¹, И.О. Иващенко¹, Л.С. Сабитов^{1,2,3}, А.С. Чепурненко^{1,2}

¹Донской государственной технической университет

²Казанский (Приволжский) федеральный университет

³Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: В статье предлагается методика оптимизации трехгранных решетчатых башенных сооружений по критерию минимума массы с учетом ограничений по прочности, предельной гибкости элементов, устойчивости, а также отсутствию резонансного вихревого возбуждения. Рассматривается решетчатая башня с поперечным сечением элементов в виде круглых труб, состоящая из двух секций. В качестве варьируемых параметров выступают ширины башни, высота нижней секции, внешние диаметры поперечного сечения поясов и решетки, количество панелей в нижней и верхней секциях. Решение задачи нелинейной оптимизации выполняется в среде MATLAB при помощи пакета Global Optimization Toolbox. Определение усилий в башне и частот собственных колебаний выполняется методом конечных элементов при помощи разработанной авторами подпрограммы для MATLAB. В качестве воздействий на башню выступает гололедная и ветровая нагрузка, собственный вес башни, а также вес оборудования. При расчете на действие ветра учитывается пульсационная составляющая. Для решения задачи нелинейной оптимизации используется метод суррогатной оптимизации. В начальном приближении масса башни составляла 2 т. В результате оптимизации массу удалось снизить более чем в 2 раза.

Ключевые слова: решетчатые башни, метод конечных элементов, суррогатная оптимизация, резонансное вихревое возбуждение.

Введение

В настоящее время оптимизация является одной из актуальных областей инженерной деятельности. Она позволяет найти лучшее решение задачи при минимальных затратах ресурсов.

Существует большое количество литературы, посвященной методам оптимизации стальных решетчатых башен. В работе [1] оптимизация геометрии башни выполнена при помощи объединения генетического алгоритма и объектно-ориентированного подхода. Башня рассматривалась как набор малых объектов. При объектно-ориентированном подходе панели башни оптимизируются независимо. В качестве целевой функции выступает вес башни. Величина напряжения и критическая нагрузка, при которой

происходит потеря устойчивости, являются основными ограничениями. В статьях [2] и [3] задача оптимизация формы была решена, исходя из условия минимума потенциальной энергии. Целевая функция здесь – объем.

В статье [4] представлен метод, который объединяет дифференциальную эволюцию, мощный алгоритм оптимизации и модель классификации на основе машинного обучения для минимизации веса стальных решетчатых башен. Разработана классификационная модель на основе алгоритма Adaptive Boosting с целью отсеивания бесперспективных вариантов в процессе оптимизации.

В [5] оптимизация конструкции башни ветряной турбины с решетчато-трубчатой гибридной конструкцией выполнена с использованием метода роя частиц. В качестве целевой функцией выступает вес, который должен быть минимальным. Ограничениями являются величина напряжения, гибкость элементов и первая частота собственных колебаний.

В работе [6] оптимизация геометрии трехгранной решетчатой башни выполнена методом конечных элементов при помощи четырех методов нелинейной оптимизации: метод внутренней точки, метод суррогатной оптимизации, генетический алгоритм и метод шаблонного поиска. Целевой функцией служили потенциальная энергия деформации, максимальное перемещение и первая частота собственных колебаний при постоянной массе.

Для решетчатых башен помимо расчета прочности, жесткости и устойчивости конструкции необходима проверка на отсутствие резонансного вихревого возбуждения [7]. Данное ограничение в указанных выше публикациях не рассматривалось.

В соответствии с СП 20.13330.2016 резонансное вихревое возбуждение не возникает при условии:

$$V_{cr,i} > V_{max}(z_{эк}), \quad (1)$$

где $V_{cr,i}$ – критическая скорость ветра, при которой происходит резонансное вихревое возбуждение, м/с; $V_{max}(z_{эк})$ – максимальная скорость ветра на эквивалентной высоте $z_{эк}$, м/с.

Критическая скорость ветра в формуле (1) определяется по формуле:

$$V_{cr,i} = \frac{k_v f_i d}{S_i}, \quad (2)$$

где k_v – коэффициент, учитывающий эффект захвата собственной частоты колебаний; f_i – собственная частота колебаний по i -й изгибной форме, Гц; d – поперечный размер сооружения, м; S_i – число Струхала поперечного сечения.

Максимальная скорость ветра определяется по формуле:

$$V_{max}(z_{эк}) = 1,5 \sqrt{w_0 k(z_e)}, \quad (3)$$

где $k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_e , w_0 – нормативное значение ветрового давления, Па.

Целью настоящей работы выступает разработка методики оптимизации решетчатых башен с учетом ограничения на возникновение резонансного вихревого возбуждения.

Постановка задачи

Рассматривается трехгранная решетчатая башня, используемая в качестве прожекторной мачты. Башня состоит из двух секций (рис.1). Ширина нижней секции меняется от B_0 до B_1 в зависимости от координаты z по линейному закону. Высота нижней секции – H_1 . Число панелей в нижней секции – n_1 . Ширина верхней секции постоянна и равна B_1 . Число панелей в верхней секции – n_2 . Поперечное сечение элементов поясов и решетки башни – круглые трубы. Наружный диаметр сечения поясов нижней секции – D_p , верхней секции – D_{p1} . Наружный диаметр раскосов нижней секции – D_r , верхней секции – D_{r1} . Наружный диаметр горизонтальных

элементов нижней секции – D_h , верхней секции – D_{hl} . Закрепление нижних узлов башни - шарнирно-неподвижное.

Толщины стенок t_i (мм) круглых труб рассчитывались в соответствии с формулой:

$$t_i = 0,0176 \cdot D_i + 1,9134, \quad (4)$$

где D_i – наружный диаметр сечения элемента, мм.

Формула (4) позволяет получить примерное значение минимальной толщины стенки круглой трубы по сортаменту ГОСТ 8732-78*.

В качестве варьируемых параметров выступают $B_0, B_1, H_1, D_p, D_{pl}, D_r, D_{rl}, D_h, D_{hl}, n_1, n_2$. Высота башни H постоянна.

Нагрузки, действующие на башню, включают в себя собственный вес конструкции и технологического оборудования, размещенного на ней, гололед и ветер [8].

Для башенных сооружений ветровая нагрузка является основной при расчете на прочность и деформативность и определяется как сумма средней и пульсационной составляющих.

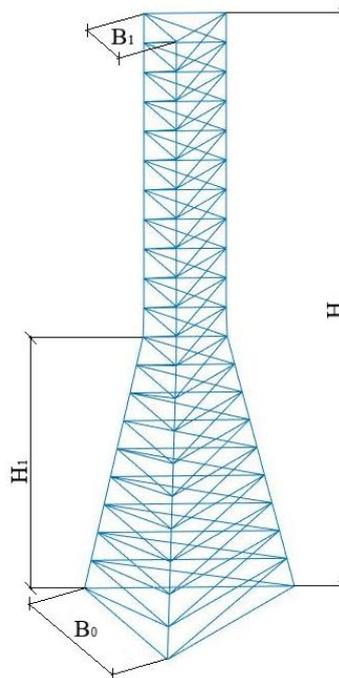


Рис. 1. – Геометрическая схема башни

Целевой функцией выступает масса, которая должна достигнуть минимума при выполнении следующих ограничений:

1. Конструкция должна удовлетворять условиям прочности $\frac{N}{A} \leq R_y \gamma_c$ и устойчивости $\frac{N}{\varphi \cdot A} \leq R_y \gamma_c$, где N – продольная сила в элементе, кН, A – площадь поперечного сечения элемента, см², φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, γ_c – коэффициент условий работы, R_y – расчетное сопротивление стали.

2. Гибкость элементов не должна превышать предельных значений $\lambda \geq \lambda_u$. Предельные гибкости определяются в соответствии с СП 16.13330.2017.

3. Критическая скорость ветра не должна превышать максимальную скорость на эквивалентной высоте $V_{cr} > V_{max}$;

4. Варьируемые параметры x_i должны лежать в диапазоне $(lb \leq x_i \leq ub)$

5. Параметры n_1 и n_2 должны быть целочисленными.

Масса сооружения вычисляется, как сумма масс стержневых элементов без учета соединительных деталей (фасонки и др.)

Методика решения задачи

Задача оптимизации решена в среде Matlab методом конечных элементов в сочетании с методом суррогатной оптимизации, входящими в состав пакета Global Optimization Toolbox.

Задача нелинейной оптимизации рассматривалась как задача нахождения минимума нелинейной целевой функции нескольких переменных $f(x)$ с ограничениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} c(x) \leq 0; \\ ceq(x) = 0; \\ A \cdot x \leq b; \\ Aeq \cdot x = beq; \\ lb \leq x \leq ub; \end{array} \right. \quad (5)$$

где x – вектор, в котором содержатся варьируемые параметр; A и Aeq – матрицы; $c(x)$ и $ceq(x)$ – нелинейные функции нескольких переменных, возвращающие скаляр; lb и ub – соответственно верхние и нижние границы для варьируемых переменных, табл. 1.

Таблица № 1

Верхние (lb) и нижние (ub) нижние границы для варьируемых переменных

Параметр	B_0 , м	B_l , м	H_l , м	n_1	n_2	$D_p, D_{p1}, D_r, D_{r1},$ D_b, D_{b1} , м
lb	1	0,84	1	4	4	0,025
ub	5	2	15	10	10	0,3

Для моделирования трехгранной решетчатой башни применялись пространственные стержневые конечные элементы с тремя степенями свободы в узле (линейные перемещения u, v, w вдоль осей x, y, z).

Локальная матрица жесткости элемента, работающего только на растяжение-сжатие, имеет вид [9]:

$$[K_e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

где E – модуль упругости материала; A – площадь поперечного сечения элемента; l – длина конечного элемента.

Переход из локальной в глобальную систему координат осуществляется при помощи матрицы направляющих косинусов $[L]$:

$$[K] = [L]^T \cdot [K_e] \cdot [L], \quad (7)$$

где $[L]^T$ – матрица, транспонированная по отношению к исходной матрице $[L]$.

Матрица направляющих косинусов $[L]$ имеет вид:

$$[L] = \begin{bmatrix} l_x & l_y & l_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_x & l_y & l_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $l_x = \frac{x_2 - x_1}{l}$, $l_y = \frac{y_2 - y_1}{l}$, $l_z = \frac{z_2 - z_1}{l}$; x, y, z – координаты элементов.

Вектор узловых перемещений $\{U\}$ определяем из решения системы уравнений МКЭ:

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\}, \quad (9)$$

где $\{F\}$ – вектор узловых нагрузок.

Собственные частоты ω определялись из уравнения:

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0, \quad (10)$$

где $[M]$ – диагональная матрица масс.

Задача оптимизации решена при помощи метода суррогатной оптимизации (surrogateopt). Алгоритм суррогатной оптимизации чередуется между двумя фазами (рис. 2):

1. Поиск якорных точек, задающих некий объем в пространстве целевых функций, в котором расположен Парето-фонт.
2. Итеративный процесс уточнения Парето-фронта.



Рис. 2. – Схема работы алгоритма суррогатной оптимизации

Алгоритм создает суррогат как интерполяцию целевой функции с использованием интерполятора радиально базисной функции (RBF) [10].

Результаты

В начальном приближении масса башни составляла 2 т. Ширины $B_0 = 2,14$ м, $B_1 = 1,84$ м, высота нижней секции $H_1 = 10,5$ м, пояса были выполнены из круглых труб сечением 170x2,8 мм, раскосы – 65x3 мм, горизонтальные элементы – 53x3 мм. Как показал расчет, данная башня удовлетворяет требованиям по прочности, жесткости, устойчивости, но не удовлетворяет проверке на отсутствие резонансного вихревого возбуждения.

Полученная в результате решения задачи методом суррогатной оптимизации оптимальная форма башни, приведена на рис. 3.

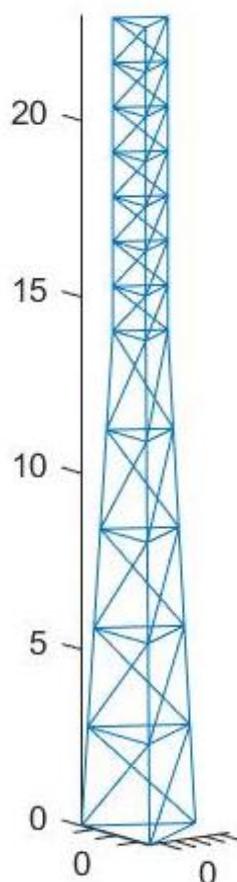


Рис. 3 – Оптимальная форма башни

Масса башни составляет 891 кг (рис. 4). Диаметры труб поясов составили 83,5 мм и 43,2 мм, наклонных элементов решетки – 68,1 мм и 34,3 мм, горизонтальных элементов решетки – 52 мм и 26,7 мм. Соответствующие толщины стенок, вычисленные по формуле (4): пояса – 3,4 и 2,7 мм, раскосы – 3,1 и 2,5 мм, горизонтальные элементы – 2,8 и 2,5 мм.

Полученные оптимальные значения варьируемых параметров приведены в табл. 2.

Таблица № 2

Оптимальные значения варьируемых параметров

B_0 , м	B_1 , м	H_1 , м	n_1	n_2
3,13	1,51	14,12	5	7

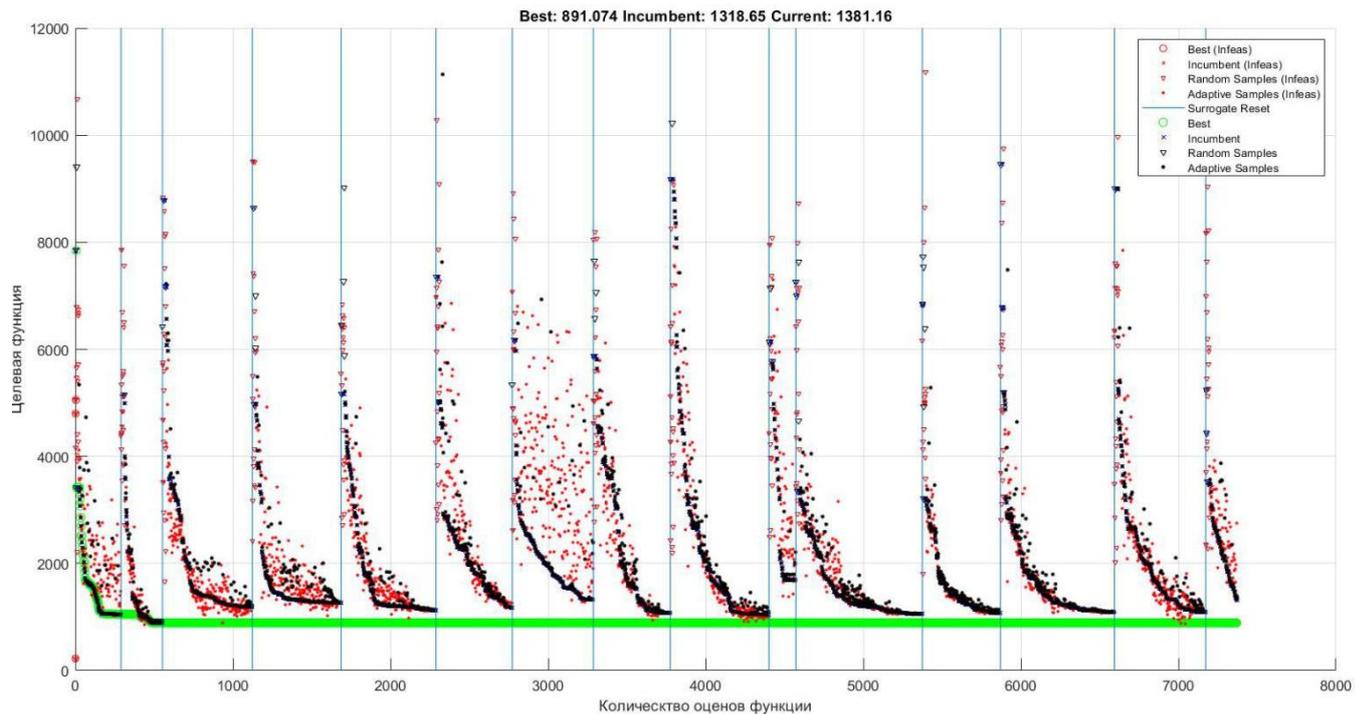


Рис. 4 – График оптимизации

Сечения элементов были округлены до ближайших значений по сортаменту ГОСТ 8732-78*.

Итоговые сечения приведены в табл. 3.

Таблица № 3

Итоговые сечения поясов и решетки башни

D_p , мм	D_r , мм	D_h , мм	D_{pl} , м	D_{rl} , мм	D_{hl} , мм
89	68	54	45	38	28
t_p , мм	t_r , мм	t_h , мм	t_{pl} , м	t_{rl} , мм	t_{hl} , мм
3,5	3,5	3	2,5	2,5	2,5

Далее башня была передана для проверки в программный комплекс «ЛИРА-САПР» (рис. 5-6). По первому предельному состоянию максимальный процент нагруженности элементов составляет 26,9%, а по второму – 99,7%.

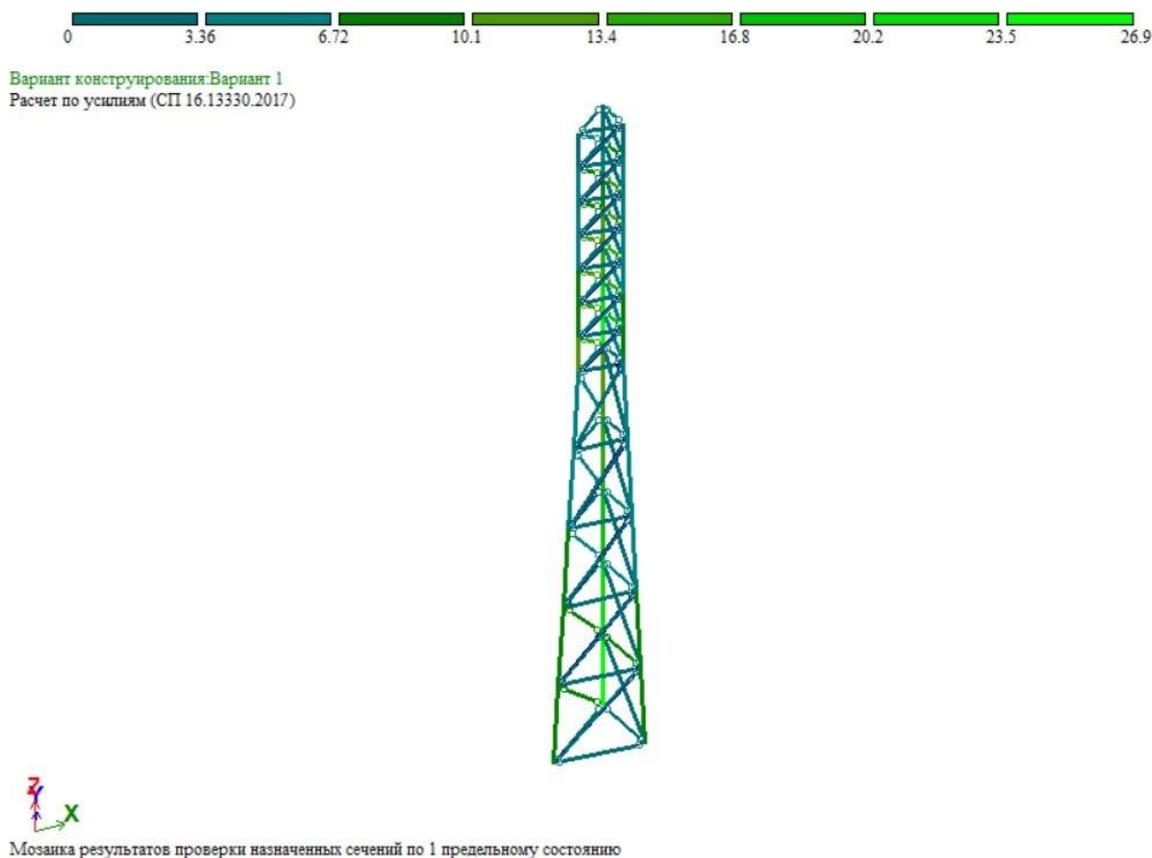


Рис. 5 – Проверка назначенных сечений по 1-ому предельному состоянию

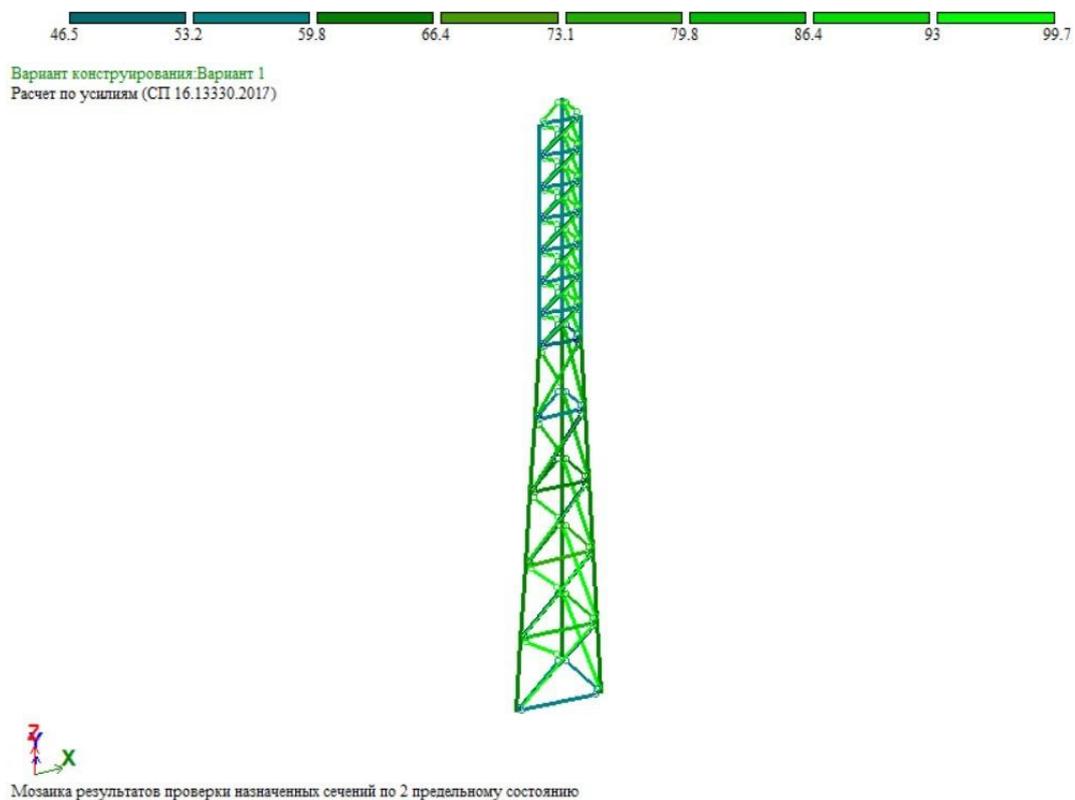


Рис. 6. – Проверка назначенных сечений по 2-ому предельному состоянию

Выводы

Разработана методика оптимизации трехгранных решетчатых башен по критерию минимума массы с учетом ограничений по прочности, жесткости, устойчивости, а также отсутствию резонансного вихревого возбуждения. По сравнению с начальным приближением, массу башни удалось снизить более чем в 2 раза. Выполнена проверка полученного конструктивного решения в ПК ЛИРА.

Литература

1. Sivakumar P., Rajaraman A., Samuel Knight G. M., Ramachandramurthy D. S. Object-Oriented Optimization Approach Using Genetic Algorithms for Lattice Towers // Journal of Computing in Civil Engineering. 2004. №18. С. 162-171.
2. Карамышева А.А., Языев Б.М., Чепурненко А.С., Языева С.Б. Оптимизация геометрических параметров двухскатной балки прямоугольного сечения // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3138.
3. Карамышева А.А., Языев Б.М., Чепурненко А.С., Языева С.Б. Оптимизация формы ступенчато-призматической балки при изгибе // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3137.
4. Nguyen T.-H., Vu A.-T. Weight optimization of steel lattice transmission towers based on Differential Evolution and machine learning classification technique // Frattura ed Integrità Strutturale. 2022. №59. С. 172-187.
5. Chen J., Yang R. , Ma R. and Li J. Design optimization of wind turbine tower with lattice-tubular hybrid structure using particle swarm algorithm // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2016. № 25(15). URL: onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tal.1281.



6. Akhtyamova L., Chepurnenko A., Rozen M., Al-Wali E. Trihedral lattice towers geometry optimization // E3S Web of Conferences. 2021. №281. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202128101024.
7. Vieira D., Barros R. C. Optimization of tubular steel lattice telecommunication towers, subjected to wind load including vortex shedding // 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design. 2017. С. 1873-1874.
8. Бадертдинов И.Р., Кузнецов И.Л., Сабитов Л.С. Напряженно-деформированное состояние трехгранных решетчатых конструкций // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. №. 11. С. 192-194.
9. Каменев С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ. 2019, 110 с.
10. Gutmann H.-M. A Radial Basis Function Method for Global Optimization // Journal of Global Optimization, 2001. № 19. С. 201–227.

References

1. Sivakumar P., Rajaraman A., Samuel Knight G. M., Ramachandramurthy D. S. Journal of Computing in Civil Engineering. 2004. №18. pp. 162-171.
2. Karamy`sheva A.A., Yazy`ev B.M., Chepurnenko A.S., Yazy`eva S.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3138.
3. Karamy`sheva A.A., Yazy`ev B.M., Chepurnenko A.S., Yazy`eva S.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3137.
4. Nguyen T.-H., Vu A.-T. Frattura ed Integrità Strutturale. 2022. №59. pp. 172-187.
5. Chen J., Yang R., Ma R., Li J. The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2016. № 25(15). URL: onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tal.1281.



6. Akhtyamova L., Chepurnenko A., Rozen M., Al-Wali E. E3S Web of Conferences. 2021. №281. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202128101024
7. Vieira D., Barros R. C. 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design. 2017. pp. 1873-1874.
8. Badertdinov I.R., Kuzneczov I.L., Sabitov L.S. Nauchno-texnicheskij vestnik Povolzh`ya. 2018. № 11. pp. 192-194.
9. Kamenev S.V. Kamenev S.V. Osnovy` metoda konechny`x e`lementov v inzhenerny`x prilozheniyax: uchebnoe posobie [Fundamentals of the finite element method in engineering applications: textbook]. Orenburg state university. Orenburg: OSU, 2019. 110 p.
10. Gutmann H.-M. A. Journal of Global Optimization. 2001. №19. pp. 201–227.