



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173

УДК 624.074.5

Научная статья

Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи

А.В. Голиков, Е.А. Михальчонок

Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

История статьи:

Поступила в редакцию: 18 апреля 2019

Доработана: 02 июня 2019

Принята к публикации: 07 июня 2019

Ключевые слова:

решетчатые башни; конструктивная форма; геометрические размеры; напряженно-деформированное состояние; группы предельных состояний; металлоемкость; напряжения; деформации; рациональные соотношения размеров

Потребность в надежных опорах для размещения и поддержания оборудования сотовых операторов возрастает с каждым годом. Классическим вариантом опор являются решетчатые башни. В настоящее время большое значение приобретает оптимизация параметров решетчатых башен, которая является одним из путей повышения эффективности их проектирования и строительства. Целью работы выбрано определение рациональной конструктивной формы решетчатых башен сотовой связи. В работе выполнены расчет и анализ башенных опор призматической и пирамидальной форм при варьировании основных геометрических параметров сооружения и соотношении параметров между собой. Для создания основных зависимостей применены методы численного моделирования. По результатам критического анализа литературы по расчету решетчатых опор высотных сооружений установлено отсутствие рекомендуемых оптимальных значений геометрических параметров сооружений и соотношений между ними. Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния расчетных моделей решетчатых башен призматической и пирамидальной форм при варьировании основных габаритных геометрических параметров сооружений. Для достижения поставленной цели по поиску рациональной конструктивной формы решетчатых опор опробованы и применены два критерия рационализации – одновременное выполнение требований обоих предельных состояний и минимизация массы сооружения. Результаты исследования решетчатых башенных опор представлены в безразмерных параметрах, что может быть использовано инженером при назначении габаритных размеров сооружения на начальном этапе проектирования.

Введение

Сооружения сотовой связи в жизни современного города играют исключительно важную роль по причине стремительно возрастающих объемов мобильного интернет-трафика. Это приводит к возрастанию необходимости установки в условиях плотной городской застройки новых опор, пред-

назначенных для размещения оборудования мобильных операторов. Классическим вариантом опор сотовой связи являются решетчатые башни.

При проектировании конструкций основное значение для заказчика в подавляющем большинстве случаев имеет стоимость конструкции в деле и срок выполнения работ. Указанные факторы зависят в большей степени от критериев эффективности проектных решений, за базовый из которых принимается металлоемкость сооружения. Именно поэтому важно правильно определить геометрические параметры и характеристики сечений элементов башни, напрямую влияющие на величину металлоемкости.

Цель работы – определение рациональной формы решетчатых башен сотовой связи.

Голиков Александр Владимирович – доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Института архитектуры и строительства, кандидат технических наук; alexandr_golikov@mail.ru
Михальчонок Елена Андреевна – магистрант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Института архитектуры и строительства.

© Голиков А.В., Михальчонок Е.А., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Задачи:

- выполнить анализ опыта проектирования и конструктивных решений опор сотовой связи;
- провести классификацию решетчатых башен по характеру работы и конструктивной форме;
- выбрать критерии оптимизации конструктивной формы башен;
- исследовать работу решетчатых башен призматической формы и определить рациональные соотношения габаритных размеров сооружения по принятым критериям;
- исследовать работу решетчатых башен пирамидальной формы и определить рациональные соотношения габаритных размеров сооружения по принятым критериям.

1. Обзор опыта проектирования башен сотовой связи

Башня в качестве опоры сотовой связи представляет собой трех- или четырехгранное высотное сооружение. Как правило, между гранями достаточно места для размещения лестницы и площадок для обслуживания оборудования.

Отличительными особенностями рассматриваемых сооружений башенного типа являются значение соотношения основания и ее высоты, значительно превышающей размеры поперечного сечения в плане, а также незначительная масса технологического оборудования по сравнению с массой самой конструкции. Данные сооружения обладают рядом преимуществ, в частности, малой площадью застройки, отсутствием вант, расположенных над коммуникациями, большой надежностью при эксплуатации.

Башни можно классифицировать по:

- количеству граней: трех-, четырех- и многогранные башни;
- конфигурации: без переломов граней по высоте и с переломами граней;
- схеме решетки: с треугольной, ромбической и др.

Наибольшее распространение получили решетчатые четырехгранные башни пирамидальной формы. Трехгранные башни целесообразно применять в случаях, когда их высота и масса технологического оборудования невелики. Башни данного силуэта менее чувствительны к осадкам фундаментов. В свою очередь, многогранные башни применяют при значительной высоте сооружения и большой нагрузке от оборудования.

Соединительная решетка обеспечивает совместную работу поясов, воспринимая сдвиг от поперечной силы. Основные типы решеток для башен: треугольная, треугольная с распорками, ромбическая, крестовая, крестоворомбическая и полураскосная.

Работа призматических и пирамидальных башенных сооружений достаточно полно изучена в трудах таких ученых, как Е.И. Беленя [1711], В.В. Горев [2], М.П. Кондра [3], М.Б. Солодарь [4], Н.С. Стрелецкий [5], О.Е. Полынцев, А.А. Романчугов [6].

В зарубежной практике изучением работы башенных сооружений занимались следующие ученые: А. Khokakaki, P. Von Buelow [7], M. Pavan Kumar, P. Markankeya Raju, G. Tirupathi Naiku [8], J. Szafran, K. Juszczak, M. Kamiński [9; 10], R. Axisa, M. Muscat, T. Sant, R.N. Farrugia [11], N. Mahesh, V. Ranga Rao [12], M. Tah Abdulaqder, M. Alsilevanai Kamiran, M. Özakça [13], а также ряд других ученых по всему миру [14–19].

2. Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования данной работы являются призматические и пирамидальные башенные опоры сотовой связи, схема решетки – треугольная с распорками (рис. 1 и 2).

Расчеты выполнены на примере башни высотой $H = 42$ м, варьируемые величины приведены в табл. 1. Высота башен выбрана по устоявшемуся опыту проектирования опор сотовой связи в городской черте, для которых предельной является высота около 42 м. Проектирование осуществляется для III ветрового района, тип местности Б.

Приведенные в работе результаты представлены в относительных единицах и могут быть экстраполированы на башни других высот.

Таблица 1

Варьируемые величины для объектов исследования
[Table 1. Variable values for objects of study]

Наименование [Name]	Обозначение [Designation]	Призматические башни, м [Prismatic towers, m]	Пирамидальные башни, м [Pyramidal towers, m]
Расчетная ширина сооружения [Estimated width facilities]	b	1,7 2,8 4,0 5,0	4,5 4,8 5,3 7,3

В литературе [5] указан рекомендуемый диапазон соотношения основания башни и высоты: $1/6-1/15H$. Для пирамидальных башен ширина верха принимается равной 1–2 м из соображения возможности размещения на площадке человека. Уклон

граней принято назначать $1/16-1/40$. В соответствии с этими рекомендациями были назначены геометрические параметры исследуемых объектов. При этом необходимым соблюдением угла наклона раскосов решетки, который должен быть в пределах $30-60^\circ$.

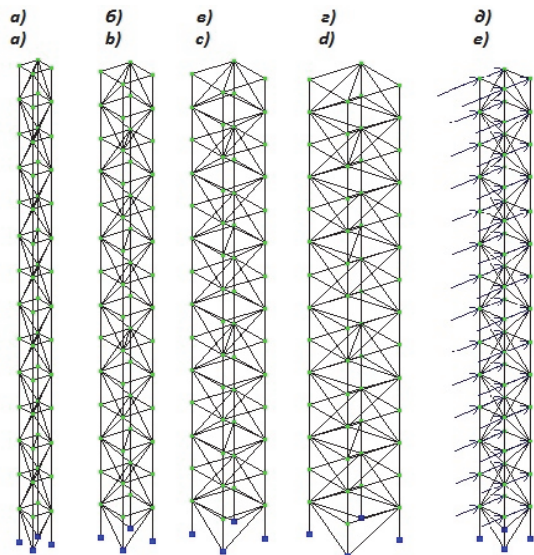


Рис. 1. Расчетные схемы призматических башен в зависимости от ширины основания и схема приложения ветровой нагрузки в ПК «ЛИРА-САПР» (д): а – 1,7 м; б – 2,8 м; в – 4,0 м; г – 5,0 м
[Figure 1. Design schemes of prismatic towers depending on the width of the base and the scheme of application of wind load in the PC “LIRA-SAPR” (e): а – 1.7 m; б – 2.8 m; в – 4.0 m; д – 5.0 m]

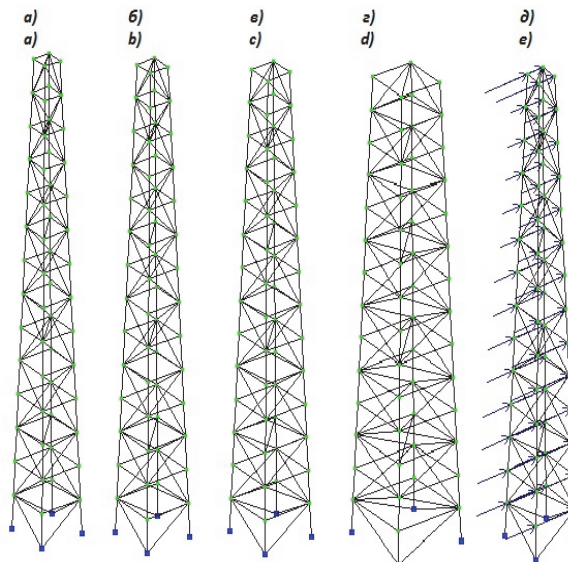


Рис. 2. Расчетные схемы пирамидальных башен в зависимости от ширины основания и схема приложения ветровой нагрузки в ПК «ЛИРА-САПР» (д): а – 4,5 м; б – 4,8 м; в – 5,3 м; г – 7,3 м
[Figure 2. Design schemes of pyramidal towers depending on the width of the base and the scheme of application of wind load in the PC “LIRA-SAPR” (e): а – 4.5 m; б – 4.8 m; в – 5.3 m; д – 7.3 m]

На башню действуют следующие нагрузки: собственный вес элементов конструкции, ветровая нагрузка, технологическая нагрузка (оборудование на отметке +42,000 м массой 100 кг и наветренной площадью 3 м^2 ; вдоль ствола башни: шесть веток фидеров диаметром 39 мм каждая и три провода для питания фонарей ЗОМ (заградительных огней малой интенсивности) диаметром 13 мм каждый).

Сбор нагрузок был выполнен в соответствии с действующими нормами. Для башен ветровая нагрузка собирается отдельно на конструкцию башни и отдельно на оборудование. Данная нагрузка напрямую связана с такими параметрами сооружения, как ширина башни, высота панели, тип и поперечный размер сечений элементов. При изменении данных параметров происходит изменение статической составляющей ветровой нагрузки, что связано с изменением проекции суммарной площади элементов конструкции на плоскость, перпендикулярную направлению действия ветровой нагрузки, изменение коэффициента лобового

сопротивления. Пульсационная составляющая нагрузки также изменяется при изменении параметров конструкции, так как при изменении геометрических характеристик сооружения изменяются и его динамические характеристики [3].

При составлении зависимостей между искомыми параметрами и действующими нагрузками особенности башенной конструкции позволяют заменить дискретную модель (пространственную ферму) на модель с параметрами, непрерывно меняющимися по высоте (стержнем). Таким образом, сбор ветровой нагрузки выполнялся как на консольный стержень, жестко заземленный у основания. При выполнении расчетов вычисляются значения внутренних усилий на всех участках. Переход к дискретной модели осуществляется путем деления полученных значений на число расчетных участков. При выполнении расчетов башни по высоте были разделены на 7 участков, в пределах которых жесткостные характеристики и распределение нагрузок принимались постоянными.

3. Результаты поиска рациональной конструктивной формы башен сотовой связи

По результатам расчетов существующих башенных опор установлено, что выбор габаритных размеров выполнен преимущественно исходя из обеспечения требований первого предельного состояния, второе предельное состояние обеспечено, как правило, с двукратным запасом. При проектировании высотных сооружений основным критерием создания формы должно быть принято одновременное соблюдение требований первого предельного состояния самой конструкцией и отдельными элементами, и соблюдение требований второго предельного состояния для всей башни в целом. Одновременное выполнение требований двух предельных состояний – основной критерий оптимизации формы башен.

Исходя из рекомендуемых диапазонов, были назначены геометрические параметры призматических башен (рис. 1). Для определения влияния ширины башни на величины металлоемкости и мак-

симальной деформации конструкции рассматривались призматические башни с шириной основания 1,7 м ($K = 0,04$), 2,8 м ($K = 0,067$), 4,0 м ($K = 0,095$) и 5,0 м ($K = 0,119$), где K – отношение ширины сооружения к его высоте, $K = b/H$, при этом высота типовой секции постоянна и составляет $h = 3,0$ м. Результат подбора сечения элементов конструкции представлен в табл. 2.

Ширина сооружения влияет непосредственно на величину ветровой нагрузки. Так, величина частоты собственных колебаний конструкции влияет на пульсационную составляющую. Зависимость изменения частот собственных колебаний призматических башенных опор данной высоты от величины K (рис. 3) можно аппроксимировать кривой следующего вида:

$$f_c = 0,095 + 24,91 \cdot K - 57,81 \cdot K^2, \quad (1)$$

где f_c – первая частота собственных колебаний, Гц; K – отношение ширины основания к высоте конструкции.

Таблица 2

Сечения элементов призматических и пирамидальных башен
[Table 2. Sections of the elements of prismatic and pyramidal towers]

Параметры башни в зависимости от очертания сооружения [The parameters of the tower, depending on the shape of the structure]	Элемент конструкции [Construction element]				
	Пояс [Belt]	Распорки [Spacers]	Раскосы [Bracing]	Металлоемкость, т [Intensity of metal, t]	
Призматические башни с высотой секции 3,0 м и шириной основания: Prismatic towers with a section height of 3,0 m and a base:	1,7 м	$\emptyset 54 \times 3,0$ $\emptyset 159 \times 3,8$	$\emptyset 32 \times 3,0$ $\emptyset 40 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	2,194
	2,8 м	$\emptyset 51 \times 3,5$ $\emptyset 140 \times 3,2$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	3,011
	4,0 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 114 \times 3,5$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 89 \times 3,0$ $\emptyset 102 \times 3,0$	4,137
	5,0 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 108 \times 3,5$	$\emptyset 89 \times 3,0$ $\emptyset 102 \times 3,0$	$\emptyset 95 \times 3,2$ $\emptyset 114 \times 4,0$	5,278
Пирамидальные башни высотой секции 3,0 м и шириной основания: Pyramidal towers with a section height of 3,0 m and a base:	4,5 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 36 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 108 \times 3,0$	2,976
	4,8 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 42 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 63,5 \times 3,0$ $\emptyset 114 \times 3,0$	3,250
	5,3 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 127 \times 3,0$	3,824
	7,3 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 89 \times 3,0$ $\emptyset 127 \times 3,0$	$\emptyset 95 \times 3,2$ $\emptyset 152 \times 3,0$	6,567
Призматические башни с основанием 2,8 м и высотой секции: Prismatic towers with a base of 2,8 m and a section height:	2,0 м	$\emptyset 38 \times 3,0$ $\emptyset 152 \times 3,0$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 73 \times 3,0$	3,499
	3,0 м	$\emptyset 51 \times 3,5$ $\emptyset 140 \times 3,2$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	3,011
	3,5 м	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 140 \times 3,2$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 76 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,8$	3,127
Пирамидальные башни с основанием 4,5 м и высотой секции: Pyramidal towers with a base of 4,5 m and a section height:	2,5 м	$\emptyset 38 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 32 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 45 \times 3,0$ $\emptyset 102 \times 3,0$	3,871
	3,0 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 36 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 108 \times 3,0$	2,976
	3,5 м	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,5$	$\emptyset 38 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 114 \times 3,0$	2,973
	6,0 м	$\emptyset 102 \times 3,0$ $\emptyset 133 \times 3,2$	$\emptyset 36 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 102 \times 3,0$ $\emptyset 152 \times 3,0$	3,448

Примечание: в числителе указаны значения, соответствующие сечению элементов верхнего участка, в знаменателе – нижнего.
[Note: the numerator indicates the values corresponding to the cross section of the elements of the upper segment, in the denominator – the lower one.]

Для упрощения расчета башни разбиваются на участки по высоте. При этом работа участков отличается. Так, нижний участок является наиболее ответственным. Именно он самый нагруженный, поскольку воспринимает нагрузку от всей конструкции и передает ее на обреш фундамента. В элементах нижнего участка возникают максимальные значения внутренних усилий, что является причиной увеличения размера поперечного сечения элементов. Примечательно, что сечения элементов верхних участков обуславливаются величиной предельной гибкости. Таким образом, происходит изменение величины металлоемкости по высоте (рис. 4).

Зависимость металлоемкости от отношения ширины основания к высоте башни (рис. 5) для призматических башен может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = 0,6383 + 6,043 \cdot K + 74,164 \cdot K^2, \quad (2)$$

где M – металлоемкость, т; K – отношение основания к высоте конструкции.

Анализируя результаты, можно сказать, что призматическая башня с отношением $K = 0,067$ (основание – 2,8 м, высота секции – 3,0 м) наиболее рациональна. При таком отношении конструкция имеет минимальную металлоемкость (рис. 5) и значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 6). Башня с отношением $K = 0,04$ (ширина основания – 1,7 м) хоть и имеет самое минимальное значение металлоемкости, но не удовлетворяет требованиям II предельного состояния, поэтому ее нельзя назвать рациональным решением. При этом во всех рассмотренных башенных сооружениях основная доля металлоемкости при-

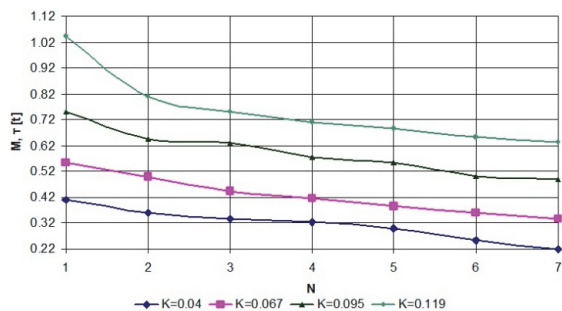


Рис. 4. График изменения металлоемкости на отдельных участках призматических башен по высоте: N – номер участка

[Figure 4. Graph of metal intensity change in selected sections of prismatic towers by height: N – section number]

ходится на раскосы, в то время как на пояса приходится наименьшая доля металлоемкости (рис. 7).

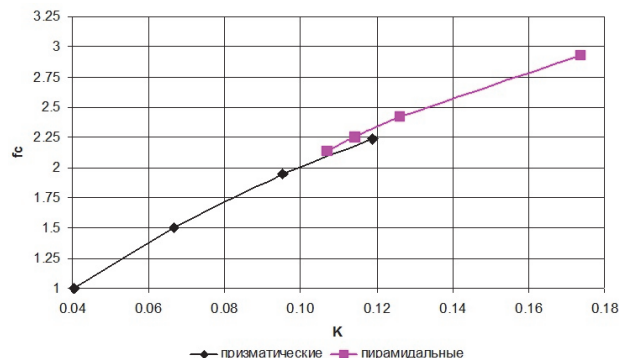


Рис. 3. График изменения частот собственных колебаний башен (f_c) в зависимости от отношения ширины основания к высоте конструкции (K): за $f_c = 1$ принято наименьшее значение частоты собственных колебаний, что соответствует призматической башне с $K = 0,04$ (ширина основания – 1,7 м)

[Figure 3. The graph of changes in the frequencies of natural oscillations of towers (f_c) as a function of the ratio of the base width to the height of the structure (K): $f_c = 1$ is the smallest value of the natural frequency, which corresponds to a prismatic tower with $K = 0,04$ (base width – 1,7 m)]

Геометрические размеры пирамидальных башен (рис. 2) были назначены аналогично призматическим башням, исходя из рекомендуемых диапазонов. Среди сооружений пирамидального очертания рассматривались башни с шириной основания 4,5 м ($K = 0,107$), 4,8 м ($K = 0,114$), 5,3 м ($K = 0,126$) и 7,3 м ($K = 0,174$), где K – отношение ширины сооружения к его высоте, $K = b/H$, при этом высота типовой секции сохранялась постоянной и составила $h = 3,0$ м. Результат подбора сечения элементов конструкции представлен в табл. 2.

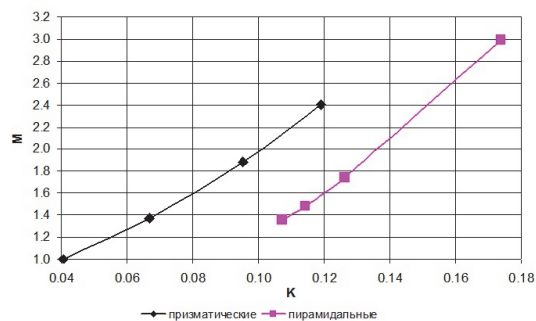


Рис. 5. График зависимости металлоемкости (M) от отношения ширины основания к высоте (K): за $M = 1$ принято наименьшее значение металлоемкости, что соответствует призматической башне с $K = 0,04$ (ширина основания – 1,7 м)

[Figure 5. The graph of metal intensity (M) as a function of the ratio of the base width to the height (K): for $M = 1$ accepted the smallest value of metal which corresponds to the prismatic tower with $K = 0,04$ (base width – 1,7 m)]

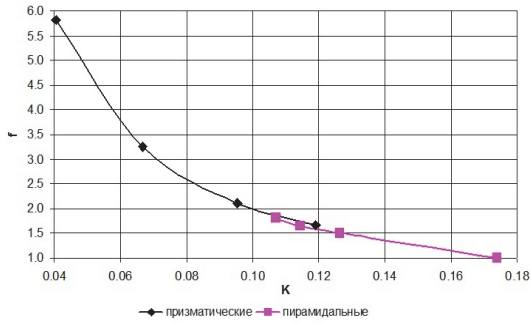


Рис. 6. График зависимости деформации (f) от отношения ширины основания к высоте (K): за $f = 1$ принято наименьшее значение деформации, что соответствует пирамидальной башне с $K = 0,174$ (ширина основания – 7,3 м)
[Figure 6. The plot of the deformation (f) versus the ratio of the base width to the height (K): $f = 1$ the smallest strain value is taken, which corresponds to a pyramidal tower with $K = 0.174$ (base width – 7.3 m)]

Изменение частоты собственных колебаний для пирамидальных башен с различной шириной основания представлено на рис. 3. Данная зависимость для пирамидальных башен может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$f_c = -0,428 + 31,39 \cdot K - 69,49 \cdot K^2, \quad (3)$$

где f_c – первая частота собственных колебаний, Гц; K – отношение ширины основания к высоте конструкции.

Аналогично призматическим башням происходит изменение металлоемкости по высоте сооружения (рис. 8).

Зависимость металлоемкости от отношения ширины основания к высоте башни (рис. 5) может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = 0,338 + 0,262 \cdot K + 86,22 \cdot K^2, \quad (4)$$

где M – металлоемкость, т; K – отношение основания к высоте башни.

Все рассматриваемые башни удовлетворяют требованиям первого и второго предельных состояний, однако пирамидальная башня с отношением $K = 0,107$ (основание – 4,5 м, высота секции – 3,0 м) имеет наименьшее значение металлоемкости (рис. 5) и максимальное значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 6), что и делает ее наиболее рациональным конструктивным решением для пирамидальных башен данной высоты. Основная доля металлоемкости также приходится на раскосы, наименьшая доля приходится на пояса (рис. 9).

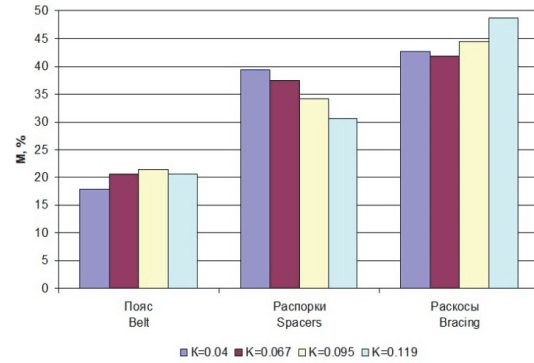


Рис. 7. Гистограмма распределения металлоемкости по элементам призматических башен
[Figure 7. Histogram of the distribution of metal among elements of prismatic towers]

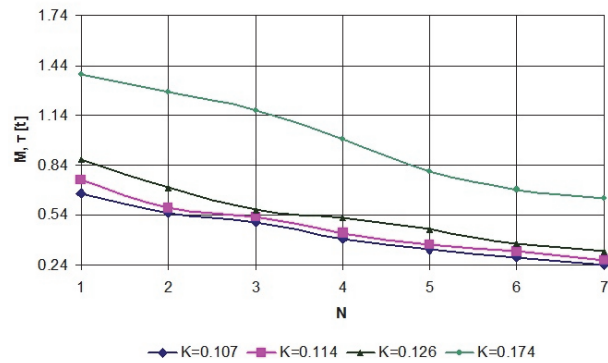


Рис. 8. График изменения металлоемкости на участках пирамидальных башен по высоте: N – номер участка
[Figure 8. Graph of metal intensity change in the areas of pyramidal towers by height: N – section number]

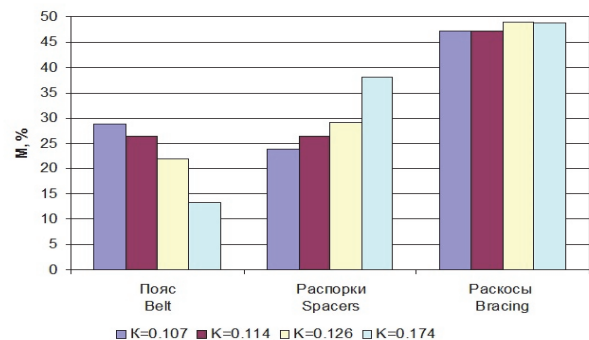


Рис. 9. Гистограмма распределения металлоемкости по элементам пирамидальных башен
[Figure 9. Histogram of the distribution of metal among the elements of pyramidal towers]

Проанализируем, как влияет высота типовой секции конструкции на величину металлоемкости всего сооружения (рис. 10). Для расчета возьмем башенную опору призматической формы высотой $H = 42$ м и с основанием 2,8 м, коэффициент отношения основания к высоте $K = 0,067$. С целью соблюдения величины угла наклона раско-

сов решетки были рассмотрены башни с высотой секции 2,0 м ($d = 0,71$), 3,0 м ($d = 1,07$) и 3,5 м ($d = 1,25$), где d – отношение высоты секции к ширине основания, $d = h/b$. Полученные сечения элементов представлены в табличной форме. Результаты подбора сечений элементов приведены в табл. 2.

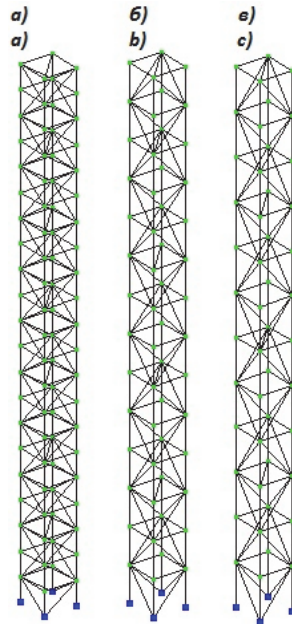


Рис. 10. Расчетные схемы призматических башен с шириной основания 2,8 м и с высотой яруса: а – 2,0 м; б – 3,0 м; в – 3,5 м

[Figure 10. Design schemes prismatic towers with a base width of 2,8 m and with a height of the tier: а – 2.0 m; б – 3.0 m; в – 3.5 m]

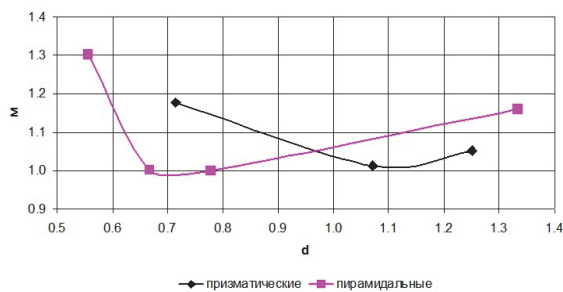


Рис. 11. График зависимости металлоемкости (M) от отношения высоты типовой секции к ширине основания (d): за $M = 1$ принято наименьшее значение металлоемкости, что соответствует пирамидальной башне с $d = 0,78$ (высота секции – 3,5 м)

[Figure 11. The graph of the dependence of metal (M) on the ratio of the height of a typical section to the width of the base (d): for $M = 1$ accepted the smallest value of metal which corresponds to the pyramidal tower with $d = 0,78$ (section height – 3,5 m)]

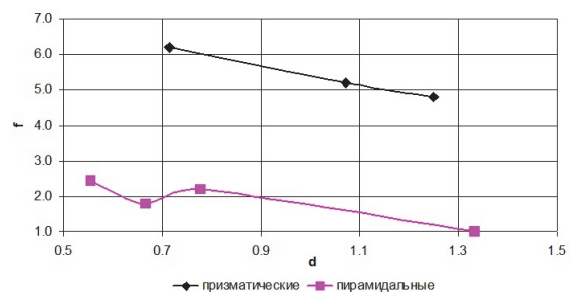


Рис. 12. График зависимости деформации (f) от отношения высоты типовой секции к ширине основания (d): за $f = 1$ принято наименьшее значение деформации, что соответствует пирамидальной башне с $d = 1,333$ (высота секции – 6,0 м)

[Figure 12. The graph of the dependence of the deformation (f) on the ratio of the height of the typical section to the base width (d): for $f = 1$ taken the smallest strain value that corresponds to the pyramidal tower with $d = 1,333$ (section height – 6,0 m)]

Зависимость металлоемкости от отношения ширины основания к высоте типовой секции (рис. 11) может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = 2,471 - 2,715 \cdot d + 1,26 \cdot d^2, \quad (5)$$

где M – металлоемкость, т; d – отношение высоты типовой секции к ширине основания.

По результатам видно, что призматическая башня с отношением $d = 1,07$ (основание – 2,8 м, высота секции – 3,0 м) наиболее рациональна, так как удовлетворяет требованиям предельных состояний, а именно, имеет минимальную металлоемкость (рис. 11) и значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 12). Башня с отношением $d = 1,25$ (высота секции – 3,0) также удовлетворяет требованиям предельных состояний, однако имеет большую металлоемкость в сравнении с башней с отношением $d = 1,07$.

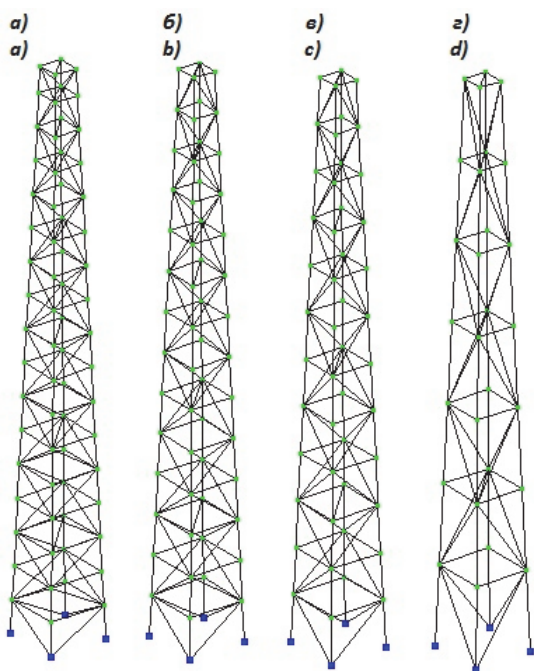


Рис. 13. Расчетные схемы пирамидальных башен с шириной основания 4,5 м и с высотой яруса:

a – 2,5 м; *б* – 3,0 м; *в* – 3,5 м; *г* – 6,0 м

[**Figure 13.** The design schemes of pyramidal towers with a base width of 4,5 m and with a height of the tier:

a – 2,5 m; *b* – 3,0 m; *c* – 3,5 m; *d* – 6,0 m]

Для дальнейшего анализа работы башен пирамидальной формы рассматривались башни высотой $H = 42$ м и с шириной основания 4,5 м, отношение основания к высоте $K = 0,107$. Изучалась работа башен с высотой секции 2,5 м ($d = 0,56$),

3 м ($d = 0,67$), 3,5 м ($d = 0,78$) и 6 м ($d = 1,33$) (рис. 13), где d – отношение высоты секции к ширине основания, $d = h/b$. Полученные сечения элементов представлены в табличной форме. Результаты подбора сечений элементов башенных опор приведены в табл. 2.

Зависимость металлоемкости от отношения высоты типовой секции к ширине основания (рис. 11) может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = \frac{1}{-0,763 + 3,891 \cdot d - 2,007 \cdot d^2}, \quad (6)$$

где M – металлоемкость, т; d – отношение основания к высоте секции.

На графике металлоемкости (рис. 11) крайняя левая точка $d = 0,56$ обусловлена увеличением количества элементов конструкции, точка $d = 1,33$ обусловлена значением предельной гибкости элементов. По графикам видно, что башня с отношением $d = 0,78$ (основание – 4,5 м, высота секции – 3,5 м) является наиболее рациональной, так как имеет минимальную металлоемкость и максимальное значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 12).

Выводы

Выполнены классификация и анализ опыта проектирования башенных опор сотовой связи; на основании анализа сделан вывод об отсутствии четкого нормирования эффективных геометрических параметров для данного типа сооружения, что обосновывает выбор предмета исследования данной статьи.

В качестве критериев оптимизации конструктивной формы приняты два основных критерия – критерий одновременного соблюдения требований двух предельных состояний, что является естественным следствием требований нормативной литературы по проектированию стальных строительных конструкций, и минимальная металлоемкость сооружения, что обеспечивает минимальную стоимость в деле.

По результатам определения влияния изменения ширины призматической башенной опоры сотовой связи на металлоемкость при условии соблюдения требований I и II предельных состояний выявлено экономически выгодное решение сооружения – опора с отношением ширины башни к ее высоте $K = 0,067$.

По итогам исследования влияния высоты типовой секции на металлоемкость призматической

опоры с отношением ширины основания башни к ее высоте $K = 0,067$ по критерию максимально допустимого значения деформации установлено, что оптимальное отношение высоты секции к ширине основания составляет $d = 1,07$.

Исследование влияния ширины основания башни пирамидальной формы на металлоемкость конструкции по критерию реализации максимально допустимого значения деформации сооружения показало, что пирамидальная башенная опора с отношением ширины основания к высоте конструкции $K = 0,107$ наиболее рациональна.

Результаты исследования зависимости металлоемкости и значения деформации сооружения как частного случая первого критерия от изменения высоты секции показали, что конструктивные решения башен с отношением высоты секции к ширине основания башни $d = 0,78$ являются наиболее экономически выгодным вариантом.

Список литературы

1. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С., Пуховский А.Б., Ведеников Г.С., Уваров Б.Ю. Металлические конструкции: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 10-е изд. / под ред. Ю.И. Кудишина. М.: Академия, 2007. С. 600–624.
2. Аржаков В.Г., Бабкин В.И., Горев В.В., Енджиговский Л.В., Зверев В.В., Казарновский В.С. Металлические конструкции: в 3 т. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения: учебник для строит. вузов. 2-е изд. / под ред. В.В. Горева. М.: Высш. шк., 2002. С. 86–117.
3. Павловский В.Ф., Кондра М.П. Стальные башни (проектирование и монтаж) / под ред. Л.И. Шитова. Киев: Будівельник, 1979. 198 с.
4. Солодарь М.Б., Кузнецова М.В., Плишкин Ю.С. Металлические конструкции вытяжных башен / под ред. Ю.А. Павлова. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1975. 186 с.
5. Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н. Металлические конструкции / под ред. Н.С. Стрелецкого. М.: Стройиздат, 1961. С. 709–739.
6. Польнцев О.Е., Романчугов А.А. Принцип пространственной конфигурации башни связи // Молодой ученый. 2012. № 2 (37). С. 40–47.
7. Khokakaki A., Von Buelow P. Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower // Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints: IASS 2014 Brasilia Symposium, September 15–19, Brasilia, Brazil. 2014. Pp. 1–8.
8. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wink speed on structural behaviour of

monopole and self-support telecommunication // Asian Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 18. No. 6. Pp. 911–927.

9. Szafran J., Juszczyk K., Kamiński M. Experiment-based reliability analysis of structural joints in a steel lattice tower // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 154. Pp. 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.006>

10. Szafran J., Kamiński M., Juszczyk K. Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state // Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters / ed. by L. Małyszko, R. Tarczewski. University of Warmia and Mazury in Olsztyn, 2016. Pp. 95–102.

11. Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R.N. Structural assessment of a lattice tower for a small, multi-bladed wind turbine // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 8. No. 4. Pp. 343–358.

12. Mahesh N., Ranga Rao V. Design and estimation of electric steel tower // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 646–652.

13. Abdulaqder M. Tah, Kamiran M. Alsilevanai, Özakça M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers // American Journal of Civil Engineering. 2017. Vol 5. No 2. Pp. 60–68.

14. Sweetly S., Aswathy Prakash. Comparative Study of Three Pole Structure with Steel and FRP using Finite Element Analysis // International Journal of Science and Research. 2016. Vol. 5. No. 7. Pp. 1266–1269.

15. Zhuge Y., Mills J.E., Ma X. Modeling of the steel lattice tower angle legs reinforced for increased capacity // Engineering Structures. 2012. Vol. 43. Pp. 160–168.

16. Jovašević S., Mohammad Reza Shah Mohammadi, Rebelo C., Pavlović M., Veljković M. New Lattice-Tubular Tower for Onshore WEC. Part 1: Structural Optimization // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 3236–3241.

17. Couceiro L., Paris J., Martínez S., Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M. Structural optimization of lattice steel transmission towers // Engineering Structures. 2016. Vol. 117. Pp. 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.005>

18. Schafhirt S., Zwick D., Muskulus M. Two-stage local optimization of lattice type support structures for offshore wind turbines // Ocean Engineering. 2016. Vol. 117. Pp. 163–173.

19. Amlan Das, Shiva Kumar. Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines // International Journal of Science and Research. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 999–1003.

Для цитирования

Голиков А.В., Михальчонок Е.А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 163–173. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173>

Determination of the rational constructive form of cellular communication towers

Alexander V. Golikov, Elena A. Mikhailchonok

Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Article history:

Received: April 18, 2019

Revised: June 02, 2019

Accepted: June 07, 2019

Keywords:

lattice towers; constructive shape; geometric dimensions; stress-strain state; limit state groups; metal intensity; stresses; strains; rational aspect ratios

The need for reliable supports for locating and maintaining the equipment of cellular operators is increasing every year. The classic version of the supports are lattice towers. At present, optimization of the parameters of lattice towers, which is one of the ways to improve the efficiency of their design and construction, is of great importance. The purpose of the work is chosen definition of a rational constructive form of lattice cellular communication towers. In the work, the calculation and analysis of the tower supports of a prismatic and pyramidal form are made with varying basic geometric parameters of the structure and the ratio of parameters between them. To create basic dependencies, numerical modeling methods are used. According to the results of a critical analysis of the literature on the calculation of lattice supports of high-rise buildings, the absence of recommended optimal values of the geometric parameters of structures and the relationship between them was established. The stress-strain state of the design models of lattice towers of a prismatic and pyramidal shape was assessed with variation of the main overall geometric parameters of the structures. To achieve the goal of finding a rational structural form of lattice supports, two rationalization criteria have been tested and applied – the simultaneous fulfillment of the requirements of both limiting states and minimization of the mass of the structure. The results of the study of lattice tower supports are presented in dimensionless parameters, which can be applied by the engineer when assigning the overall dimensions of the structure at the initial design stage.

References

1. Kudishin YuI, Belenya EI, Ignatieva VS, Pukhovskiy AB, Vedenikov GS, Uvarov BYu. *Metallicheskiye konstruksii: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy [Metal constructions: a textbook for students of higher educational institutions]*. 10th ed. Moscow: Akademiya Publ.; 2007. pp. 600–624. (In Russ.)

2. Arzhakov VG, Babkin VI, Gorev VV, Endzhiievskiy LV, Zverev VV, Kazarnovskiy VS. *Metallicheskiye konstruksii: v 3 t. T. 3. Spetsial'nyye konstruksii i sooruzheniya: uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [Metal constructions: in 3 vols. Vol. 3. Special structures and structures: a textbook for construction universities]*. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2002. pp. 86–117. (In Russ.)

3. Pavlovskiy VF, Kondra MP. *Stal'nyye bashni (proektirovaniye i montazh) [Steel towers (design and installation)]*. Kiev: Budivel'nik; 1979. (In Russ.)

4. Solodar BB, Kuznetsova MV, Plishkin YuS. *Metallicheskiye konstruksii vytyazhnykh bashen [Metal structures of exhaust towers]*. Leningrad: Stroiizdat Publ., Leningrad Branch; 1975. (In Russ.)

5. Streletskiy NS, Geniyev AN, Belenya EI, Baldin VA, Lessig EN. *Metallicheskiye konstruksii [Metal constructions]*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1961. pp. 709–739. (In Russ.)

6. Polyntsev OE, Romanchugov AA. Printsip prostanstvennoi konfiguratsii bashni svyazi [The principle of the spatial configuration of the communication tower]. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*. 2012;2(37): 40–47. (In Russ.)

7. Khokakaki A, Von Buelow P. Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower. *Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints: IASS 2014 Brasilia Symposium, September 15–19, Brasilia, Brazil*. 2014: 1–8.

8. Pavan Kumar M, Markankeya Raju P, Tirupathi Naiku G. Effect of wink speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017;18(6): 911–927.

9. Szafran J, Juszczyk K, Kamiński M. Experiment-based reliability analysis of structural joints in a steel

Alexander V. Golikov – Associate Professor of the Department of Building Construction, Foundations and Reliability of Structures, Institute of Architecture and Construction, PhD in Technical Sciences; alexandr_golikov@mail.ru

Elena A. Mikhailchonok – master student of the Department of Building Construction, Foundations and Reliability of Structures, Institute of Architecture and Civil Engineering.

lattice tower. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;154: 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.006>

10. Szafran J, Kamiński M, Juszczak K. Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state. In: Małyszko L, Tarczewski R. (eds.) *Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters*. University of Warmia and Mazury in Olsztyn; 2016. pp. 95–102.

11. Axisa R, Muscat M, Sant T, Farrugia RN. Structural assessment of a lattice tower for a small, multi-bladed wind turbine. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017;8(4): 343–358.

12. Mahesh N, Ranga Rao V. Design and estimation of electric steel tower. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2017;8(1): 646–652.

13. Abdulaqder M Tah, Kamiran M Alsilevanai, Özakça M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers. *American Journal of Civil Engineering*. 2017;5(2): 60–68.

14. Sweety S, Prakash A. Comparative Study of Three Pole Structure with Steel and FRP using Finite Element Analysis. *International Journal of Science and Research*. 2016;5(7): 1266–1269.

15. Zhuge Y, Mills JE, Ma X. Modeling of the steel lattice tower angle legs reinforced for increased capacity. *Engineering Structures*. 2012;43: 160–168.

16. Jovašević S, Reza Shah Mohammadi M, Rebelo C, Pavlović M, Veljković M. New Lattice-Tubular Tower for Onshore WEC. Part 1: Structural Optimization. *Procedia Engineering*. 2017;199: 3236–3241.

17. Couceiro I, Paris J, Martínez S, Colominas I, Navarrina F, Casteleiro M. Structural optimization of lattice steel transmission towers. *Engineering Structures*. 2016;117: 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.005>

18. Schafhirt S, Zwick D, Muskulus M. Two-stage local optimization of lattice type support structures for offshore wind turbines. *Ocean Engineering*. 2016;117: 163–173.

19. Amlan Das, Shiva Kumar. Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines. *International Journal of Science and Research*. 2015;4(4): 999–1003.

For citation

Golikov AV, Mikhailchonok EA. Determination of the rational constructive form of cellular communication towers. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 163–173. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173>. (In Russ.)