

УДК 624.971.4

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-3-182-192

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Рационализация конструктивной формы башен с предварительно напряженными затяжками

И.Р. Ситников¹, А.В. Голиков²

Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400131, Волгоград, просп. Ленина, 28

Ключевые слова:

проектирование;
металлические конструкции;
стальная башня;
новое конструктивное решение;
параллельные затяжки;
расчетная схема;
конструирование;
сравнительный расчет

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 февраля 2019 г.
Доработана: 12 апреля 2019 г.
Принята к публикации: 16 мая 2019 г.

Для цитирования

Ситников И.Р., Голиков А.В. Рационализация конструктивной формы башен с предварительно напряженными затяжками // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 182–192. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-182-192>

Аннотация

Актуальность. Одним из основных направлений развития систем мобильной связи, радиотехнических и телекоммуникационных систем является совершенствование конструктивной формы несущих опор, что позволит решить ряд практических задач: увеличить зону покрытия, обеспечить более высокие показатели скорости передачи данных и стабильность работы в условиях растущего количества пользователей. Указанные обстоятельства обосновывают актуальность исследований в данном направлении.

Цели. Задача исследования заключалась в оптимизации конструктивного решения башен с параллельными затяжками, обеспечивающего возможность возведения и безопасной эксплуатации на протяжении заданного срока службы путем выполнения требований по прочности, устойчивости и деформациям к таким сооружениям при минимальной материалоемкости.

Методы. Для расчетов применялся метод конечных элементов для математического моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов, а при создании линейки моделей для численных экспериментов – метод математического планирования экспериментов.

Результаты. В статье рассмотрена работа башен предложенного конструктивного решения в качестве опор для размещения оборудования операторов сотовой связи на примере башни высотой 42 м. Для установления основных характеристик напряженно-деформированного состояния конструкций опор созданы и рассчитаны модели в программных комплексах, в основу работы которых заложен метод конечных элементов. Выполнен сравнительный анализ усилий в оттяжках, определенных аналитическим расчетом и методом конечных элементов, а также анализ изменения напряженно-деформированного состояния башен от воздействия влияющих факторов, таких как ветровая и гололедно-ветровая нагрузки, угол наклона оттяжек на нижнем ярусе башни. По критерию минимальной металлоемкости и технологичности возведения башен определены рациональные габаритные размеры башни. Предложены варианты конструирования основных узлов сопряжений элементов башни.

Введение

В городской черте для размещения телекоммуникационного оборудования предложено применение башен с центральным стволom, предварительно напряженным параллельными затяжками.

Цель работы – оптимизация конструктивного решения башен с параллельными затяжками, обеспечивающего возможность возведения и безопасной эксплуатации на протяжении заданного срока службы, что достигается выполнением требований по прочности, устойчивости и деформациям к таким сооружениям при минимальной материалоемкости.

Задачи, решаемые в работе:

– сравнение результатов аналитического расчета и результатов численных экспериментов с использованием программ, в основу работы которых положен метод конечных элементов (МКЭ);

¹ Ситников Иван Романович, магистрант, кафедра «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений», eLIBRARY SPIN-код: 5244-5000, AuthorID: 986522.

² Голиков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений», eLIBRARY SPIN-код: 1369-7819, AuthorID: 847929, alexandr_golikov@mail.ru

© Ситников И.Р., Голиков А.В., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

- расчет на гололедно-ветровую нагрузку, сравнение влияния воздействия на башни с параллельными затяжками ветровой и гололедно-ветровой нагрузок;

- проработка конструктивного решения, позволяющего обеспечить технологичность возведения башен с параллельными затяжками;

- анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) башен с параллельными затяжками с различными углами наклона оттяжек на нижнем ярусе.

Объектом исследования является несущий каркас башен высотой до 42 м с центральным стволом, предварительно напряженным параллельными затяжками.

Критерии оптимизации:

- положительное значение натяжения в заветренных тросах;

- максимальное приближение запасов несущей способности и запасов жесткости сооружения при подборе габаритных геометрических размеров и сечения элементов башни;

- угол наклона вантовых элементов к вертикали;

- трудоемкость изготовления.

Ограничивающий фактор при подборе габаритных геометрических размеров и сечения элементов башни – диаметр оттяжек.

1. Исследования по расчету и проектированию башенных и предварительно напряженных конструкций

Расчету и проектированию башенных и вантовых конструкций посвящено большое количество работ как российских, так и зарубежных ученых.

Анализ существующего опыта проектирования и расчета башенных конструкций и вантовых систем подробно приведен в статьях А.В. Голикова и И.Р. Ситникова [1], а также А.В. Голикова, В.В. Губанова и И.М. Гаранжи [2].

С момента выхода первых трудов по результатам предварительных исследований данного конструктивного решения учеными, работающими в направлении изучения работы башенных опор и совершенствовании их конструктивной форм, проведен ряд исследований. Детальный обзор вантовых и предварительно напряженных конструкций выполнен С.Н. Кривошапко в [3]. В работе В. Conde, А. Villarino, М. Cabaleiro и D. Gonzalez-Aguilera [4] рассмотрена комбинация систем лазерного сканирования и методологии конечных элементов, которая воспроизводит геометрическую реальность конструкций башен, обнаруживая дефекты и особенности их сборки, благодаря чему можно анализи-

ровать и количественно оценивать влияние этих недостатков на их структурное поведение с учетом полученной фактической геометрии, различных структурных моделей и предложенных гипотез нагрузки. В трудах Wei Lin, Gangbing Song и Shanghong Chen [5] и Li Tian, Kunjie Rong, Peng Zhang, Yuping Liu [6] проанализировано применение средств контроля вибрации башен с настраиваемым демпфером массы при ветровом и сейсмическом воздействиях.

На данный момент также проводятся исследования прогрессирующего разрушения башен при ветровых и сейсмических нагрузках. Так, в работе Shan Gao и Sheliang Wang [7] предложена оценка хрупкой кривой прогрессирующего обрушения, основанная на вероятности обрушения башен при ветровых нагрузках, для оценки антиколлапсовых характеристик. В работе Xiaohong Long, Wei Wang и Jian Fan [8] выполнен анализ разрушения башни, подвергшейся землетрясению.

В области предварительно напряженных конструкций изучается возможность применения предварительно напряженных стержней из полимерных материалов [9–11], анализируется влияние на натяжение тросов внешних воздействий, таких как температура конструкции, трение опор оттяжек, временные опоры конструкции [12]. Также проводятся исследования по оценке распределения потерь предварительного напряжения во время предварительного и последующего натяжений [13]. В статье R. Pichal и J. Machacek [14] рассмотрена работа предварительно сжатых колонн под нагрузкой, определены критические нагрузки для потери устойчивости в пространстве и плоскости.

2. Краткая характеристика объекта исследования

Башня с параллельными затяжками представляет собой свободностоящую вантовую систему, заземленную в основании посредством своего фундамента (1) и выполненную в виде пространственного предварительно напряженного стержня переменной по высоте жесткости, состоящего из центрального ствола и ванта, равноудаленных на заданном диаметре. Башня включает центральный ствол переменной жесткости (3), промежуточные ригели – горизонтальные элементы (4), разделяющие башню на ярусы, и оттяжки (5). Для обеспечения постоянного уровня усилий преднапряжения в оттяжках предусмотрены натяжные устройства – талрепы (6). Подбор диаметра оттяжек осуществляется по диаметру талрепа и его несущей способности.

Башня устанавливается на опорную раму (2), которая анкерными болтами крепится к фундаменту.

Общий вид башни с параллельными затяжками представлен на рис. 1.

Расчет конструкций башни и анализ НДС выполнен для единых исходных данных – формы, габаритных размеров, района строительства, условий эксплуатации (табл. 1).

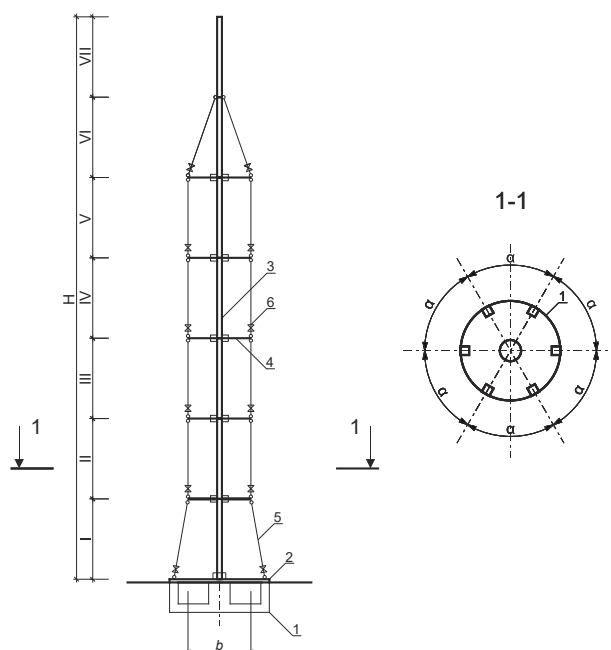


Рис. 1. Общий вид башни с параллельными затяжками
[Figure 1. General view of the tower with parallel puffs]

Таблица 1

Основные общие геометрические характеристики башен и расчетные положения
[Table 1. Basic general geometric characteristics of towers and design positions]

Наименование [Name]	Обозначение [Designation]	Значение [Value]	Единица измерения [Measuring unit]
Ветровой район [Wind region]	3		
Тип местности [Terrain type]	A		
Гололедный район [Ice region]	III		
Высота сооружения [Building height]	H	30	метр (м)
Расчетная ширина сооружения [Estimated construction width]	b	2,4	метр (м)
Высота типовой секции башни [Height of the typical section of the tower]	h	6	метр (м)
Угол между оттяжками в плане [Angle between the cables in the plan]	α	30	градус (°)
Форма сооружения [Form of construction]	призматическая		
Сечения элементов башни [Section of the tower elements]	из труб		
Предельное отклонение верха башни [Maximum deviation of the top of the tower]	$\Delta_{\text{гор}}$	300	миллиметр (мм)
Радиус площадки [Radius of the site]	r	1,2	метр (м)
Количество тяжей [Number of cables]	$n_{\text{т}}$	12	штука (шт.)

3. Аналитическое описание модели башни с параллельными затяжками

Основное сочетание нагрузок на башню состоит из:

- собственного веса башни и веса технологического оборудования;
- ветровой нагрузки;
- нагрузки от предварительного напряжения в вантовых элементах;
- технологической нагрузки: оборудование общей массой 100 кг, площадью 2,9 м², находящееся на отметке 42,0 м; вдоль ствола башни 3 ветки фидеров Ø22 мм каждая.

При воздействии основного сочетания нагрузок в башне возникает общий изгибающий момент, а в центральном стволе – сжимающее усилие (рис. 2).

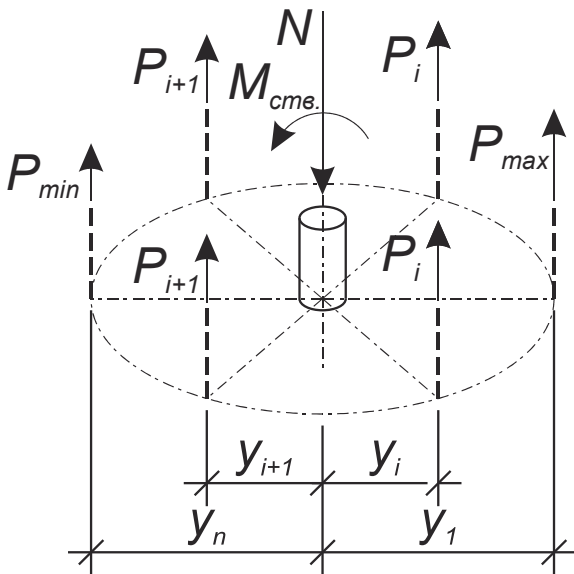


Рис. 2. Схема к определению геометрических характеристик сечения и усилий в оттяжках и стволе башни аналитическим методом
[Figure 2. Scheme for the determination of cross section geometric characteristics and efforts in trunk cables and tower by analytical method]

Расчетное сжимающее усилие в стволе зависит от величины предварительного натяжения оттяжек и может быть определено по формуле

$$N_{\text{ств.}} = \sum N_{\text{с.в. } i} + nP_{\text{нат.}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{с.в.}}$ – собственный вес секций башни; n – общее количество оттяжек; $P_{\text{нат.}}$ – усилия предварительного натяжения оттяжек.

Общий изгибающий момент, возникающий в сечении башни, определяется по формуле

$$M_{\text{общ.}} = \sum W_i h_i, \quad (2)$$

где W_i – ветровая нагрузка на границе яруса башни; h_i – отметки границ ярусов башни.

Общий изгибающий момент распределяется между центральным стволом башни и оттяжками пропорционально их жесткости. Тогда расчетный изгибающий момент в центральном стволе и расчетный изгибающий момент, приходящийся на оттяжки, можно определить по формулам

$$M = \frac{I_{\text{ств.}}}{I} M_{\text{общ.}}, \quad (3)$$

$$M_{\text{тяж.}} = \frac{I_{\text{тяж.общ.}}}{I} M_{\text{общ.}}, \quad (4)$$

где M – момент в центральном стволе; $M_{\text{тяж.}}$ – момент, приходящийся на оттяжки; I – момент инерции всего сечения башни; $I_{\text{ств.}}$ – момент инерции центрального ствола; $I_{\text{тяж.общ.}}$ – момент инерции всех тяжей относительно центральной оси сечения башни.

Момент инерции всех тяжей относительно центральной оси сечения башни можно определить по формуле

$$I_{\text{тяж.общ.}} = nI_{\text{тяж.}} + A_{\text{тяж.}} \sum y_i^2, \quad (5)$$

где $I_{\text{тяж.}}$ – момент инерции сечения одного тяжа; $A_{\text{тяж.}}$ – площадь поперечного сечения тяжа; y_i – расстояние от оси поворота (оси центрального ствола) до оттяжки.

Момент инерции всего сечения башни:

$$I = I_{\text{ств.}} + I_{\text{тяж.общ.}}. \quad (6)$$

Усилия в оттяжках (рис. 7) определяются по формуле

$$P_i = \pm \frac{M_{\text{тяж.}} y_i}{\sum y_i^2} + P_{\text{нат.}}, \quad (7)$$

где P_i – действующее усилие в i -ой оттяжке; $M_{\text{тяж.}}$ – изгибающий момент, распределяемый между оттяжками.

Усилие в наиболее нагруженной оттяжке:

$$P_{\text{max}} = + \frac{M_{\text{тяж.}} y_1}{\sum y_i^2} + P_{\text{нат.}}. \quad (8)$$

Усилие в наименее нагруженной оттяжке:

$$P_{\text{min}} = - \frac{M_{\text{тяж.}} y_n}{\sum y_i^2} + P_{\text{нат.}}. \quad (9)$$

Предварительное натяжение в вантовых элементах выбирается с тем условием, что при работе сооружения под нагрузкой они должны быть растянуты. Таким образом, для нормальной работы конструкции необходимо выполнение условия

$$P_{\min} > 0. \quad (10)$$

Результаты расчетов по определению усилий в оттяжках для I и II ярусов приведены в табл. 2.

Для изучения характера работы башен с предварительно напряженным стволом созданы как ана-

литические, так и численные модели. Для расчетов численных моделей применен метод конечных элементов с использованием программно-вычислительного комплекса «ЛИРА-САПР». Расчет башен выполнен в нелинейной постановке, реализуя работу вантовых элементов только на растяжение, а также с учетом динамических эффектов, вызванных пульсациями ветра и зональным действием ветровой нагрузки. Для подтверждения достоверности данных проанализированы результаты, полученные двумя методами (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение результатов аналитического расчета и результатов МКЭ
 [Table 2. Comparison of the results of the analytical calculation and the results of the FEM]

№ оттяжки [Cable number]	y, м [y, m]	I ярус [I tier]			II ярус [II tier]		
		Аналитическое усилие в оттяжке, кН [Analytical effort in the cable, kN]	Расчетное усилие в оттяжках по МКЭ, кН [Calculated effort in cables on FEM, kN]	Расхождение результатов, Δ ₁ [Discrepancy results, Δ ₁]	Аналитическое усилие в оттяжке, кН [Analytical effort in the cable, kN]	Расчетное усилие в оттяжках по МКЭ, кН [Calculated effort in cables on FEM, kN]	Расхождение результатов, Δ ₂ [Discrepancy results, Δ ₂]
1	-1,2	65,27	91,7	28,8 %	48,86	70,1	30,3 %
2	-1,039	75,97	98,9	23,2 %	56,93	75,4	24,5 %
3	-0,6	105,14	119	11,7 %	78,93	89,9	12,2 %
4	0	145,00	146	0,3 %	109,00	110	0,9 %
5	0,6	184,86	172	-7,5 %	139,07	130	-7,0 %
6	1,039	214,03	192	-11,5 %	161,07	144	-11,9 %
7	1,2	224,73	199	-12,9 %	169,14	149	-13,5 %
Σy _i ²	8,638						

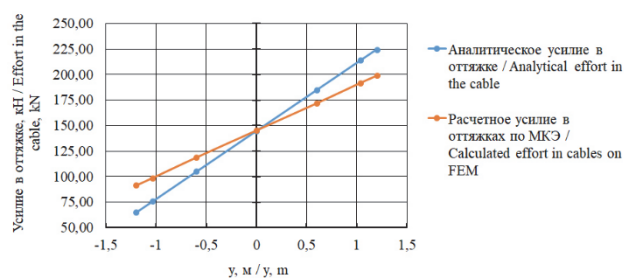


Рис 3. Распределение усилий в оттяжках I яруса
 [Figure 3. Distribution of effort in the cables of the I tier]

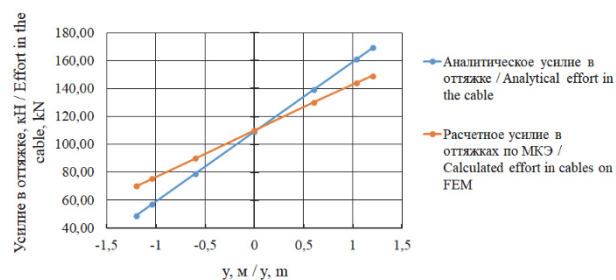


Рис 4. Распределение усилий в оттяжках II яруса
 [Figure 4. Distribution of effort in the cables of the II tier]

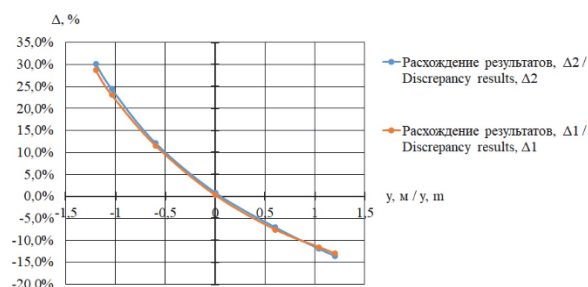


Рис 5. Изменение расхождения результатов расчетов усилий в оттяжках для I и II ярусов
 [Figure 5. Change in the difference between the results of calculations of efforts in the cables for tiers I and II]

Распределение усилий в оттяжках I яруса представлено на рис. 3, распределение усилий в оттяжках II яруса представлено на рис. 4.

Разница усилий (рис. 3 и 4) подчиняется линейному закону, общий вид которого схож с изменением ординаты положения центра тяжести сечения оттяжки.

На рис. 5 представлено изменение расхождения результатов расчетов усилий в оттяжках для I и II ярусов.

Из графика рис. 5 следует, что для вант сжатой зоны расхождение результатов расчетов на обоих ярусах достигает 30 %, для вант растянутой зоны – 14 %. Для других ярусов башни расхождения будут аналогичными. Этот результат свидетельствует о возможности введения поправочных коэффициентов для аналитического нелинейного моделирования и перехода к проверке на физической модели. В качестве поправочного коэффициента можно учесть степень загруженности i -ой затяжки (по отношению к наиболее нагруженному тяжу).

4. Исследование влияния гололедно-ветровой нагрузки на работу башни

Оледенению подвержены все элементы конструкции башни (как ствол, так и тяжи). Толщина стенки гололеда оказывает существенное влияние на вантовые элементы, поскольку суммарная толщина стенки гололеда ($D = d_{\text{вант}} + 2 t_{\text{гололед}}$) может быть как сопоставима с диаметром тяжа, так и значительно превышать диаметр.

Расчет строительных решетчатых конструкций выполняется на совместное действие нагрузок: собственный вес + вес гололеда + ветер на оледеневшие конструкции.

Лед образуется на элементах сооружения неравномерно. При расчете принята условная средняя толщина корки льда для III гололедного района, равная 10 мм.

Ветровая нагрузка при гололеде возникает в результате ветрового давления на обледенелые элементы. Распределение средней ветровой нагрузки и ветровой нагрузки при гололеде по высоте отражено на рис. 6.

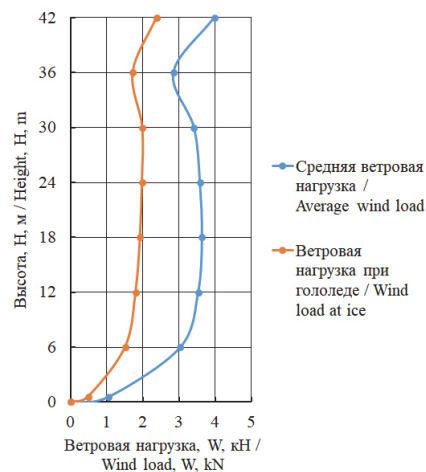


Рис. 6. Распределение средней ветровой нагрузки и ветровой нагрузки при гололеде по высоте
[Figure 6. Distribution of average wind load and wind load at ice]

Таблица 3

Сравнение влияния воздействия на башни с параллельными затяжками ветровой и гололедно-ветровой нагрузок
[Table 3. Comparison of the wind and ice-wind loads impact on the towers with parallel cables]

№ яруса [Tier number]	Элемент [Element]	Сечение [Section]	Основная ветровая нагрузка [Main wind load]		Гололедно-ветровая нагрузка [Ice-wind load]	
			Напряжения, кН/см ² [Stress, kN/cm ²]	Деформации, см [Deformations, cm]	Напряжения, кН/см ² [Stress, kN/cm ²]	Деформации, см [Deformations, cm]
7	Ствол [Stem]	Ø180×10	21,1	40,3	12,7	24
6	Ствол [Stem]	Ø194×10	12,5		9,4	
	Тяжи [Cables]	Ø18	18,8		14,7	
5	Ствол [Stem]	Ø219×12	18,4		13,1	
	Тяжи [Cables]	Ø20	18,8		14,9	
4	Ствол [Stem]	Ø245×12	20,7		15,4	
	Тяжи [Cables]	Ø25	20,2		16,1	
3	Ствол [Stem]	Ø273×14	20,9		15,9	
	Тяжи [Cables]	Ø30	21,1		16,9	
2	Ствол [Stem]	Ø299×16	21,6		18,9	
	Тяжи [Cables]	Ø36	20,6		16,6	
1	Ствол [Stem]	Ø325×18	23,3		17,9	
	Тяжи [Cables]	Ø40	22,2		17,7	

Напряжения в элементах башни и отклонение верха башни от воздействия ветровой и гололедно-ветровой нагрузок представлены в табл. 3.

В наиболее нагруженном элементе центрального ствола напряжения от воздействия основной ветровой нагрузки больше напряжений от гололед-

но-ветровой нагрузки на 23 %. В наиболее нагруженной оттяжке напряжения от воздействия основной ветровой нагрузки больше напряжений от гололедно-ветровой нагрузки на 20 %.

Отклонение верха башни от воздействия основной ветровой нагрузки больше отклонения верха башни от гололедно-ветровой нагрузки на 40 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для рассматриваемого конструктивного решения главным расчетным воздействием является основная ветровая нагрузка.

График значений превышения напряжений по сочетанию «вес + ветер» по отношению к сочетанию «вес + вес гололеда + ветер при гололеде» для элементов центрального ствола и оттяжек приведен на рис. 7.

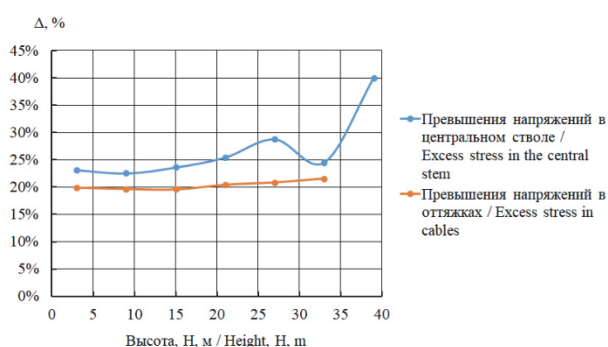


Рис. 7. Превышения напряжений по сочетанию «вес + ветер» по отношению к сочетанию «вес + вес гололеда + ветер при гололеде» [Figure 7. Excess stress in the combination of "weight + wind" in relation to the combination of "weight + weight of ice + wind at ice"]

Максимальное превышение напряжений по сочетанию «вес + ветер» по отношению к сочетанию «вес + вес гололеда + ветер при гололеде» в центральном стволе составляет 40 %, минимальное – 23 %. Среднее значение превышения напряжений в центральном стволе – 27 %. Большой разброс значений превышений объясняется особенностями при-

нятой конструктивной схемы, отсутствием оттяжек на верхнем ярусе.

Приблизительная аппроксимирующая зависимость для изменения превышения напряжений по сочетанию «вес + ветер» по отношению к сочетанию «вес + вес гололеда + ветер при гололеде» в центральном стволе по высоте башни имеет вид

$$\Delta = 1,865 \cdot 10^{-4} \cdot H^2 - 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot H + 2,496 \cdot 10^{-1}, \quad (11)$$

где H – отметка центра яруса, м; Δ – превышение напряжений.

Превышения напряжений по сочетанию «вес + ветер» по отношению к сочетанию «вес + вес гололеда + ветер при гололеде» в оттяжках изменяются в узком диапазоне, среднее значение превышения напряжений – 20 %.

Изменение превышения напряжений в оттяжках может быть аппроксимировано зависимостью вида

$$\Delta = 3,305 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 - 5,952 \cdot 10^{-4} \cdot H + 1,998 \cdot 10^{-1}. \quad (12)$$

5. Результаты исследования изменения угла наклона тязей на нижнем участке башни

Для оценки влияния осредненной ширины основания двух нижних участков на снижение массы башни следует увеличить ширину основания двух нижних участков. Таким образом, эпюра изгибающих моментов от действия ветровой нагрузки описывается конструктивной формой башни.

На данном этапе исследования рассмотрено увеличение ширины основания нижнего участка башни. Для этого выбраны следующие значения углов наклона оттяжек на нижнем ярусе: 5, 10, 15, 20 градусов.

Сечения элементов, определенные для башен с принятыми углами наклона оттяжек на нижнем ярусе, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сечения элементов башен с различными углами наклона оттяжек на нижнем ярусе [Table 4. Cross sections of elements of the towers with different angles of inclination of the cables on the lower tier]

№ яруса [Tier number]	Элемент [Element]	Угол наклона оттяжек [Angle of tilt cables]				
		0°	5°	10°	15°	20°
7	Ствол [Stem]	Ø180×10	Ø180×10	Ø180×10	Ø180×10	Ø180×10
6	Ствол [Stem]	Ø194×10	Ø194×10	Ø194×10	Ø194×10	Ø194×10
	Тязи [Cables]	Ø18	Ø18	Ø18	Ø18	Ø18
5	Ствол [Stem]	Ø219×12	Ø219×12	Ø219×12	Ø219×12	Ø219×12
	Тязи [Cables]	Ø20	Ø20	Ø20	Ø20	Ø20
4	Ствол [Stem]	Ø245×12	Ø245×12	Ø245×12	Ø245×12	Ø245×14
	Тязи [Cables]	Ø25	Ø25	Ø25	Ø25	Ø25

3	Ствол [Stem]	Ø273×14	Ø273×14	Ø273×14	Ø273×14	Ø273×18
	Тяжи [Cables]	Ø30	Ø30	Ø30	Ø30	Ø30
2	Ствол [Stem]	Ø299×16	Ø299×16	Ø299×16	Ø299×20	Ø325×22
	Тяжи [Cables]	Ø36	Ø36	Ø36	Ø36	Ø36
1	Ствол [Stem]	Ø325×18	Ø299×16	Ø325×18	Ø351×22	Ø351×24
	Тяжи [Cables]	Ø40	Ø36	Ø36	Ø36	Ø36
Металлоемкость, т [Metal consumption, ton]		11,32	11,04	11,19	11,61	12,09

Влияние угла наклона оттяжек на нижнем ярусе на металлоемкость башни отображено на рис. 8.

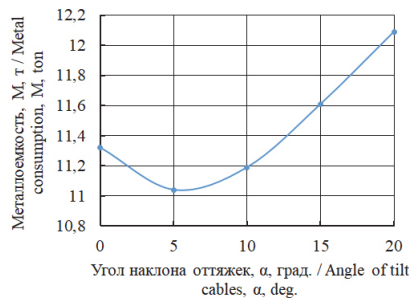


Рис. 8. Влияние угла наклона оттяжек на нижнем ярусе на металлоемкость башни
[Figure 8. The influence of the angle of inclination of the cables on the lower tier on the consumption of materials of the tower]

Влияние угла наклона оттяжек на нижнем ярусе на металлоемкость башни может быть аппроксимировано кривой вида

$$M = -2,467 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^3 + 1,251 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha^2 - 1,131 \cdot 10^{-1} \cdot \alpha + 11,32, \quad (13)$$

где M – металлоемкость башни, т; α – угол наклона оттяжек на нижнем ярусе башни, градус.

Минимальная металлоемкость башни получена при угле наклона оттяжек на нижнем ярусе, равном 5°. При углах 4–7° сечения элементов на двух нижних ярусах можно принять одинаковыми. Полученный результат способствует снижению металлоемкости башни и увеличению технологичности ее возведения.

6. Разработка конструктивных решений, позволяющих реализовать предлагаемый тип башни

Башня с параллельными затяжками представляет собой пространственный предварительно напряженный стержень переменной по высоте жесткости. Изменение жесткости по высоте возможно

выполнить ступенчато, разделением башни на участки – ярусы, путем применения монтажных (отправочных) секций.

На границах каждого яруса элементы центрального ствола соединяются с параллельными затяжками при помощи жестко соединенных со столом ригелей.

Для обеспечения передачи внутренних усилий в элементах центрального ствола и неразрезности конструкции узел сопряжения элементов центрального ствола наиболее оптимально выполнять в виде фланцевого соединения. При таком способе сопряжения элементов ствола ригели прикрепляются к продольным ребрам ствола в местах фланцевого соединения. Таким образом, каждый ярус башни реализуется в виде отдельной секции с центральным стволом, а также ригелями у верхней и нижней границ и вант, равноудаленных на заданном диаметре.

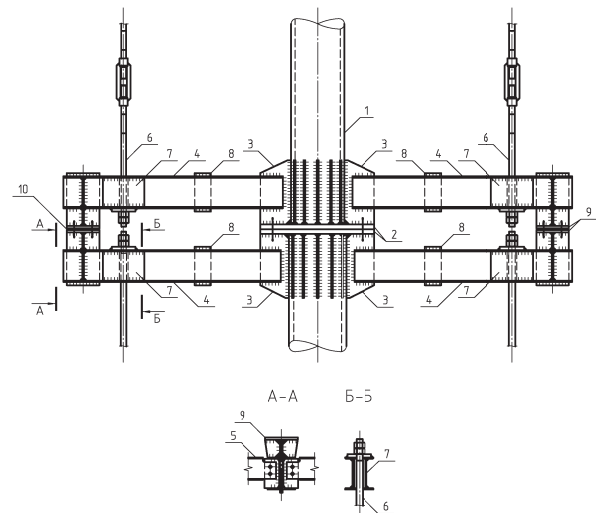


Рис. 9. Узел стыковки секций башни
[Figure 9. Knot of docking of sections of a tower]

В сборе узел стыковки секций башни представляет собой жесткий рамный блок (рис. 9). Соединение элементов центрального ствола (1) выполняется на фланцах (2). К продольным ребрам ствола

ла (3) в местах фланцевого соединения прикрепляются ригели рамы (4). Ригели рамы и балки площадки (5) образуют жесткий диск площадки в плане. На ригели рамы по границам секций башни закрепляются оттяжки (6). Для надежного закрепления оттяжек ригели рамы выполняются в виде двух швеллеров. В местах крепления оттяжек стенки швеллеров усиливаются пластинами (7). Для связи швеллеров между собой и обеспечения их совместной работы между ними устанавливаются прокладки (8).

Для обеспечения неразрезности конструкции башни по внешнему диаметру площадки секций по краям ригелей стыкуются на внешних фланцах (9). Между внешними фланцами устраивается зазор для выверки (10), в который устанавливается пластина по месту.

Перед поставкой на строительную площадку монтажные секции башни подлежат контрольной сборке на заводе-изготовителе.

Выводы

В ходе исследования достигнута поставленная цель: выполнена оптимизация конструктивного решения башен с параллельными затяжками, обеспечивающего возможность возведения и безопасной эксплуатации на протяжении заданного срока службы, что достигается выполнением требований по прочности, устойчивости и деформациям к таким сооружениям при минимальной материалоемкости.

Сравнение результатов аналитического расчета и результатов численных экспериментов с использованием программ, в основу работы которых положен МКЭ, показало, что для вант сжатой зоны расхождение результатов расчетов на ярусах башни достигает 30 %, для вант растянутой зоны – 14 %. Это позволяет осуществить ввод поправочных коэффициентов для аналитического нелинейного моделирования и перехода к проверке на физической модели.

Представлены качественные и количественные характеристики изменения НДС башен от рассматриваемых влияющих факторов.

Выполнен проверочный расчет башни и ее элементов на сочетание нагрузок «вес башни + вес оборудования + вес гололедных отложений + ветер при гололеде». Максимальное превышение напряжений по сочетанию «вес + ветер» по отношению к сочетанию «вес + вес гололеда + ветер при гололеде» в центральном стволе составляет 40 %, минимальное – 23 %. Среднее значение превышения напряжений в центральном стволе – 27 %.

Среднее значение превышения напряжений в оттяжках – 20 %.

Анализ НДС башен с параллельными затяжками с различными углами наклона оттяжек на нижнем ярусе показал, что при углах 4–7° сечения элементов на двух нижних ярусах можно принять одинаковыми. Полученный результат способствует снижению металлоемкости башни и увеличению технологичности ее возведения.

Проработано конструктивное решение узла стыковки секций башни, позволяющего обеспечить технологичность возведения и безопасной эксплуатации башен с параллельными затяжками.

В качестве перспектив дальнейшего исследования можно выделить:

- выполнение расчета на резонансное вихревое возбуждение;
- анализ НДС узлов сопряжения элементов башни;
- изучение влияния на стоимость конструктивного решения технологии изготовления и возведения (по критерию трудоемкости);
- установление границы применимости высоты исследуемого конструктивного решения в зависимости от технологической нагрузки и района строительства.

Список литературы

1. *Голиков А.В., Ситников И.Р.* Напряженно-деформированное состояние башен с параллельными затяжками // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 7. С. 43–49.
2. *Golikov A., Gubanov V., Garanzha I.* Atypical structural systems for mobile communication towers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. No. 5. 052010. doi.org/10.1088/1757-899X/365/5/052010
3. *Кривошапко С.Н.* Вантовые структуры // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 1. С. 9–22.
4. *Conde B., Villarino A., Cabaleiro M., Gonzalez-Aguilera D.* Geometrical Issues on the Structural Analysis of Transmission Electricity Towers Thanks to Laser Scanning Technology and Finite Element Method // *MDPI Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. Issue 9. Pp. 11551–11569. https://doi.org/10.3390/rs70911551
5. *Lin W., Song G., Chen S.* PTMD Control on a Benchmark TV Tower under Earthquake and Wind Load Excitations // *MDPI Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. Issue 4. P. 425.
6. *Tian L., Rong K., Zhang P., Liu Y.* Vibration Control of a Power Transmission Tower with Pounding Tuned Mass Damper under Multi-Component Seismic Excitations // *Appl. Sci*. 2017. Vol. 7. Issue 4. P. 477. https://doi.org/10.3390/app7050477

7. *Shan Gao, Sheliang Wang*. Progressive Collapse Analysis of Latticed Telecommunication Towers under Wind Loads // *Advances in Civil Engineering*. 2018. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/3293506>

8. *Xiaohong Long, Wei Wang, Jian Fan*. Collapse Analysis of Transmission Tower Subjected to Earthquake Ground Motion // *Modelling and Simulation in Engineering*. 2018. Article ID 2687561. 20 p. <https://doi.org/10.1155/2018/2687561>

9. *Ghafoori E., Motavalli M.* A Retrofit Theory to Prevent Fatigue Crack Initiation in Aging Riveted Bridges Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Materials // *MDPI Polymers*. 2016. Vol. 8. 308.

10. *Sena-Cruz J., Michels J., Harmanci Y.E., Correia L.* Flexural strengthening of RC slabs with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 81. Pp. 158–170.

11. *Alcaraz Carrillo de Albornoz V., García del Toro E.M., Más-López M.I., Luizaga Patiño A.* Experimental Study of a New Strengthening Technique of RC Beams Using Prestressed NSM CFRP Bars // *MDPI Sustainability*. 2019. Vol. 11. 1374.

12. *Liu X., Zhang A., Fu W.* Cable Tension Preslack Method Construction Simulation and Engineering Application for a Prestressed Suspended Dome // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Pp. 1–17.

13. *Shen S., Wang Y., Ma S.-L., Huang D., Wu Z.-H., Guo X.* Evaluation of Prestress Loss Distribution during Pre-Tensioning and Post-Tensioning Using Long-Gauge Fiber Bragg Grating Sensors // *Sensors*. 2018. Vol. 18. 4106.

14. *Richal R., Machacek J.* Buckling and Post-buckling of Prestressed Stainless Steel Stayed Columns // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. Pp. 875–882.

RESEARCH PAPER

Rationalization of the constructive form of towers with prestressed cables

Ivan R. Sitnikov¹, Alexander V. Golikov²

Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400131, Russian Federation

Keywords:

design;
metal structures;
steel tower;
new design solution;
parallel tightening;
design scheme;
design;
comparative calculation

Article history:

Received: February 11, 2019

Revised: April 12, 2019

Accepted: May 16, 2019

For citation

Sitnikov I.R., Golikov A.V. (2019). Rationalization of the constructive form of towers with prestressed cables. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(3), 182–192. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-182-192> (In Russ.)

Abstract

Relevance. One of the main directions of development of mobile communication systems, radio engineering and telecommunication systems is the improvement of the structural form of the bearing supports, which will solve a number of practical tasks: to increase the coverage area, to ensure higher rates of data transmission speed and to ensure stable operation in an increasing number of users. These circumstances justify the relevance of research in this direction.

Aims of research. Optimization of design solutions using parallel puffs, ensuring the possibility of erection and safe operation during the entire service life, which ensures that the requirements for strength, stability and deformations for such structures are met with minimal material consumption.

Methods. For calculations, finite element methods are used for mathematical modeling using software and computing systems. To create linear models for numerical experiments, the method of mathematical planning of experiments was used.

Results. The work of the towers of the proposed constructive solution is considered as supports for the placement of equipment of cellular operators using the example of a 42-meter tower. The method of mathematical planning of experiments was used to create a model line for numerical experiments. To establish the basic characteristics of the stress-strain state of the structures of the supports, a number of models were created and calculated in software packages, the basis of which is the finite element method. A comparative analysis of the effort in the delays determined by analytical calculation and the finite element method is performed. The analysis of changes in the stress-strain state of the towers from the influence of influencing factors, such as wind and icy-wind loads, the angle of deflection on the lower tier of the tower. By the criterion of minimum metal consumption and manufacturability of the construction of towers, rational overall dimensions of the tower were determined. The options for constructing the main junctions of the elements of the tower are proposed.

¹ Ivan R. Sitnikov, master student, Department “Building Structures, Foundations and Reliability of Structures”, eLIBRARY SPIN-code: 5244-5000, AuthorID: 986522.

² Alexander V. Golikov, Cand. Tech. Sci., senior lecturer, Department “Building Structures, Foundations and Reliability of Structures”, eLIBRARY SPIN-code: 1369-7819, AuthorID: 847929, alexandr_golikov@mail.ru

References

1. Golikov A.V., Sitnikov I.R. (2018). Stress-strain state of towers with parallel puffs. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and civil engineering]*, (7), 43–49. (In Russ.)
2. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. (2018). Atypical structural systems for mobile communication towers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (365), 052010. doi: 10.1088/1757-899X/365/5/052010
3. Krivoshapko S.N. (2016). Cable-stayed structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (1), 9–22. (In Russ.)
4. Conde B., Villarino A., Cabaleiro M., Gonzalez-Aguilera D. (2015). Geometrical Issues on the Structural Analysis of Transmission Electricity Towers Thanks to Laser Scanning Technology and Finite Element Method. *Remote Sens.*, 7(9), 11551–11569. <https://doi.org/10.3390/rs70911551>
5. Lin W., Song G., Chen S. (2017). PTMD Control on a Benchmark TV Tower under Earthquake and Wind Load Excitations. *Appl. Sci.*, 7(4), 425. <https://doi.org/10.3390/app7040425>
6. Tian L., Rong K., Zhang P., Liu Y. (2017). Vibration Control of a Power Transmission Tower with Pounding Tuned Mass Damper under Multi-Component Seismic Excitations. *Appl. Sci.*, 7(5), 477. <https://doi.org/10.3390/app7050477>
7. Shan Gao, Sheliang Wang. (2018). Progressive Collapse Analysis of Latticed Telecommunication Towers under Wind Loads. *Advances in Civil Engineering*, 1–13. Article ID 3293506. <https://doi.org/10.1155/2018/3293506>
8. Xiaohong Long, Wei Wang, Jian Fan. (2018). Collapse Analysis of Transmission Tower Subjected to Earthquake Ground Motion. *Modelling and Simulation in Engineering*. Article ID 2687561. <https://doi.org/10.1155/2018/2687561>
9. Ghafoori E., Motavalli M. (2016). A Retrofit Theory to Prevent Fatigue Crack Initiation in Aging Riveted Bridges Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Materials. *MDPI Polymers*, 8, 308.
10. Sena-Cruz J., Michels J., Harmanci Y.E., Correia L. (2015). Flexural strengthening of RC slabs with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. *Composites Part B: Engineering*, 81, 158–170.
11. Alcaraz Carrillo de Albornoz V., García del Toro E.M., Más-López M.I., Luizaga Patiño A. (2019). Experimental Study of a New Strengthening Technique of RC Beams Using Prestressed NSM CFRP Bars. *MDPI Sustainability*, 11, 1374.
12. Liu X., Zhang A., Fu W. (2015). Cable Tension Preslack Method Construction Simulation and Engineering Application for a Prestressed Suspended Dome. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1–17.
13. Shen S., Wang Y., Ma S.-L., Huang D., Wu Z.-H., Guo X. (2018). Evaluation of Prestress Loss Distribution during Pre-Tensioning and Post-Tensioning Using Long-Gauge Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*, 18(12), 4106. <https://doi.org/10.3390/s18124106>
14. Richal R., Machacek J. (2017). Buckling and Post-Buckling of Prestressed Stainless Steel Stayed Columns. *Procedia Engineering*, (172), 875–882.