

УДК 624.014

Напряженно-деформированное состояние башен с параллельными затяжками

Александр Владимирович ГОЛИКОВ, кандидат технических наук, доцент, e-mail: alexandr_golikov@mail.ru

Иван Романович СИТНИКОВ, магистрант, e-mail: ivansitnikoff@mail.ru

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 400074 Волгоград, ул. Академическая, 1

Аннотация. Установка мачт на оттяжках для размещения телекоммуникационного оборудования в условиях плотной городской застройки в большинстве случаев невозможна или затруднена. Решетчатые башни призматической формы вносят значительные изменения в архитектурную композицию города. В качестве альтернативы предложено новое конструктивное решение башен, представляющих собой центральный ствол с параллельно расположенными по внешней окружности предварительно напряженными затяжками. Выполнены анализ и систематизация существующего опыта создания конструктивной формы башенных сооружений. Рассмотрена работа башен предложенного конструктивного решения в качестве опор для размещения оборудования операторов сотовой связи. Для создания линейки моделей для численных экспериментов применялся метод математического планирования экспериментов. Для расчетов использован метод конечных элементов для математического моделирования с помощью программно-вычислительных комплексов. Проанализированы изменения напряженно-деформированного состояния башен от воздействия влияющих факторов, таких как ветровая и полезная нагрузки, а также в зависимости от диаметра расположения предварительно напряженных тяжей и их количества. По критерию минимальной металлоемкости башен определены рациональные размеры башни и соотношения ее геометрических параметров. Предложены предварительные рекомендации по конструированию. Указаны направления совершенствования конструктивной формы башен данного конструктивного решения.

Ключевые слова: стальная башня, новое конструктивное решение, параллельные затяжки, расчетная схема, конструирование, сравнительный расчет.

STRESS-STRAIN STATE OF TOWERS WITH PARALLEL TIGHTENINGS

Alexander V. GOLIKOV, e-mail: alexandr_golikov@mail.ru

Ivan R. SITNIKOV, e-mail: ivansitnikoff@mail.ru

Volgograd State Technical University, ul. Akademicheskaja, 1, Volgograd 400074, Russian Federation

Abstract. The installation of masts on the braces to accommodate telecommunications equipment under the conditions of dense urban development is in most cases impossible or difficult. Latticed prismatic towers make significant changes in the architectural composition of the city. As an alternative, a new constructive solution of the towers, representing a central barrel with parallel pre-stressed tightening along the outer circumference, is proposed. The analysis and systematization of the existing experience in creating a constructive form of tower structures is performed. The work of the towers of the proposed constructive solution as supports for the location of the equipment of cellular operators is considered. To create a line of models for numerical experiments, the method of mathematical designing of experiments was used. For calculations, the finite element method was used for mathematical modeling with the help of software and computer complexes. The analysis of the changes in the stress-strain state of towers from influencing factors such as wind and payload, the diameter of the location of pre-stressed strings and their number was made. The rational dimensions of the tower and the ratio of its geometric parameters are determined by the criterion of minimum metal consumption of the towers. Preliminary recommendations for designing are offered. The directions of improving the constructive shape of the towers of this constructive solution are indicated.

Key words: steel tower, new constructive solution, parallel tightenings, design scheme, design, comparative calculation.

При расчете вант исходят из того, что они представляют собой гибкие нити. Теории гибкой нити посвящено много работ как в нашей стране, так и в других странах.

В отечественной научной литературе работа гибких нитей и различных типов вантово-стержневых систем наиболее полно

изложена А. В. Перельмутером [1]. Примеры расчета гибких нитей и пространственных конструкций с применением вантовых систем, которые позволяют выполнять расчеты конструкций без больших затрат труда, привел Г. Г. Виноградов [2].

В своих трудах Ю. В. Гайдаров одним из первых обобщил обла-

сти применения металлических преднапряженных конструкций [3]. Также им были сформулированы основные принципы расчета таких систем.

Вопросы комбинированных вантовых систем и принципы их оптимального проектирования подробно изложили В. В. Трофимович и В. А. Пермяков [4].

Работа радиомачт и их аэродинамика были исследованы Г. А. Савицким [5]. Изложенная им методика расчета радиомачт позволила значительно снизить металлоемкость этих конструкций, а также исправила ошибки и недостатки прежних методов.

Совершенствование расчетов мачтовых конструкций продолжил А. Г. Соколов. В его трудах были предложены принципиальные подходы по выбору оптимальных решений опор и их расчету [6].

Главной особенностью рассчитываемых мачтовых опор было наклонное расположение предварительно напрягаемых опорных вант и крепление их к отдельным фундаментам. В перечисленных выше работах не рассматривалось крепление вант к горизонтальным элементам башни и единому с башней фундаменту.

Одним из первых, кто разработал конструктивное решение радиомачты в виде вантовой системы с центральным стволом, был А. А. Воеводин. Кроме того, он изложил теоретические основы расчета участка центральной стойки с параллельными затяжками на действие сил собственного веса и усилий преднапряжения вантовых элементов [7]. Однако в его работах рассмотрены башни только с одним уровнем параллельных затяжек.

Большой вклад в изучение работы и конструирование башенных сооружений внес М. Б. Солодарь [8].

В зарубежной практике вопросы расчета различных типов преднапряженных стальных конструкций наиболее полно освещены в работах G. Ballio, F. M. Mazzolani [9], S. K. Duggal [10].

Пути и тенденции дальнейшего развития теории расчета вантовых конструкций были изложены в трудах N. S. Trahair, M. A. Bradford, D. A. Nethercot, L. Gard-

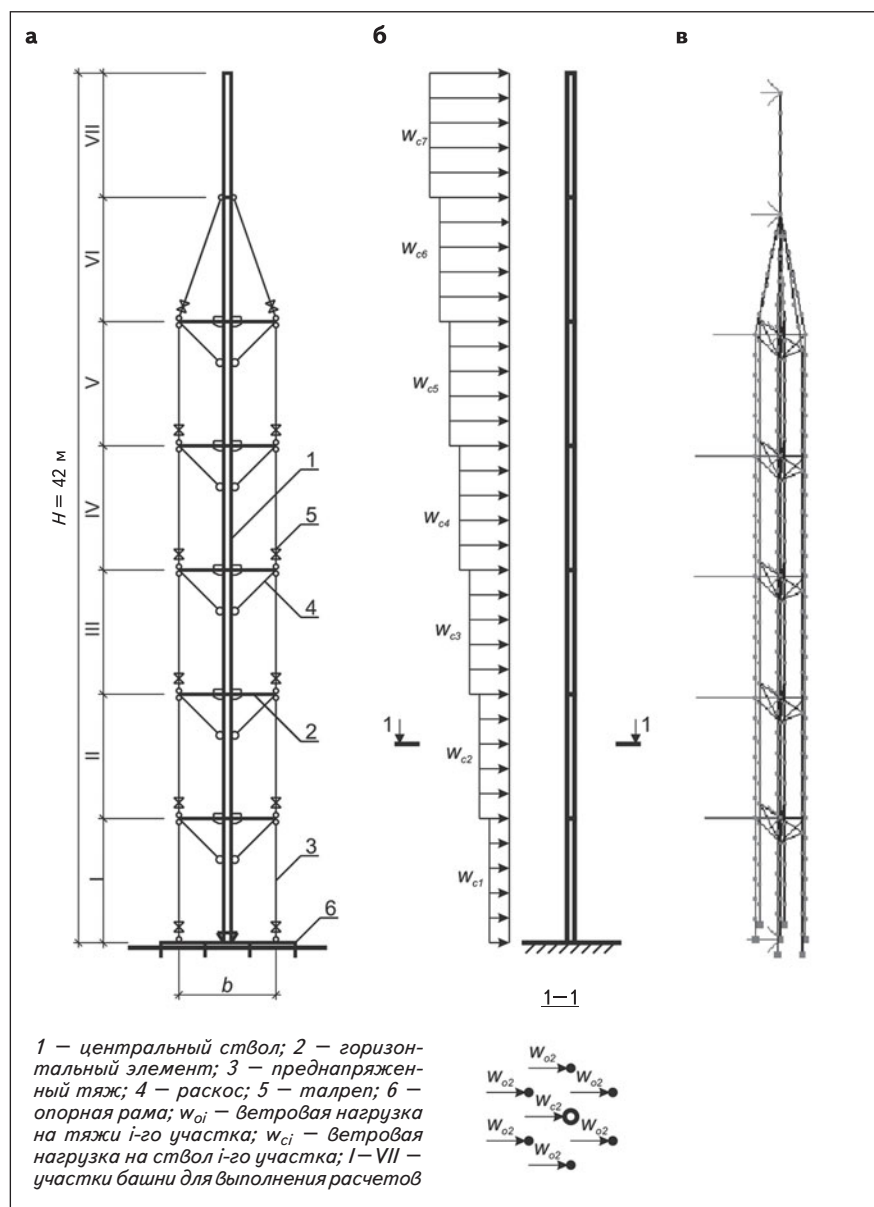


Рис. 1. Конструктивная схема башни (а), распределение ветровой нагрузки по ее высоте (б) и схема приложения ветровой нагрузки к расчетной схеме в ПК «ЛИРА-САПР» (в). На схеме б башня показана условно, без тязей и площадок

ner [11]. Примером опоры с вантовыми элементами служит башня Sydney Eye Tower высотой 309 м в Австралии архит. Д. Крона. Основные результаты экспериментальных исследований последних лет отражены в публикациях таких ученых, как J. Szafaran, R. Travanca [12–15].

Влияние расположения оборудования на напряженное состояние решетчатых башен исследовали Е. В. Горохов, С. Ф. Пичу-

гин, А. В. Махинько, Я. В. Назим [16]. Исследованием различных конструктивных решений башенных сооружений в последние годы занимались S. Jovašević, M. Pavlović [17, 18].

Исходные данные для расчетов

Объектом данного исследования стали башенные опоры высотой 42 м в виде вантовой системы с центральным стволом. Ши-

1. Сбор ветровой нагрузки

Номер участка	Отметка границ, м	Элемент	Сечение	Коэффициент $k(z_e)$	w_m , кН/м	Коэффициент $\zeta(z_e)$	w_p , кН/м	w , кН/м	W , кН
VII	42	Ствол	$\varnothing 180 \times 9$	1,504	1,366	0,620	0,743	2,513	2,714
		Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	—	0,620	0,405	—	—
	36	Оборудование		1,538	0,818	0,613	0,409	1,227	3,560
VI	36	Ствол	$\varnothing 245 \times 22$	1,431	1,135	0,635	1,525	3,816	14,716
		Тяжи	$\varnothing 65$	—	—	0,635	—	—	—
	30	Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	0,761	0,635	0,395	—	—
V	30	Ствол	$\varnothing 273 \times 24$	1,347	1,557	0,655	2,153	4,810	23,963
		Тяжи	$\varnothing 70$	—	—	0,655	—	—	—
		Раскосы	$\varnothing 42 \times 5$	—	—	0,655	—	—	—
		Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	0,717	0,655	0,383	—	—
	24	Горизонтальный элемент	12Б2	1,390	0,740	0,645	1,008	1,748	0,587
IV	24	Ствол	$\varnothing 299 \times 24$	1,249	1,432	0,680	2,053	4,518	23,579
		Тяжи	$\varnothing 70$	—	—	0,680	—	—	—
		Раскосы	$\varnothing 50 \times 6$	—	—	0,680	—	—	—
		Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	0,665	0,680	0,369	—	—
	18	Горизонтальный элемент	12Б2	1,300	0,692	0,666	0,973	1,665	0,559
III	18	Ствол	$\varnothing 325 \times 26$	1,129	1,290	0,715	1,942	4,183	22,485
		Тяжи	$\varnothing 70$	—	—	0,715	—	—	—
		Раскосы	$\varnothing 50 \times 6$	—	—	0,715	—	—	—
		Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	0,601	0,715	0,351	—	—
	12	Горизонтальный элемент	12Б2	1,193	0,635	0,696	0,930	1,565	0,526
II	12	Ствол	$\varnothing 351 \times 26$	0,969	1,091	0,772	1,768	3,700	21,507
		Тяжи	$\varnothing 75$	—	—	0,772	—	—	—
		Раскосы	$\varnothing 60 \times 12$	—	—	0,772	—	—	—
		Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	0,515	0,772	0,325	—	—
	6	Горизонтальный элемент	12Б2	1,056	0,562	0,739	0,873	1,435	0,482
I	6	Ствол	$\varnothing 377 \times 34$	0,697	0,778	0,910	1,478	2,902	18,472
		Тяжи	$\varnothing 85$	—	—	0,910	—	—	—
		Раскосы	$\varnothing 63,5 \times 12$	—	—	0,910	—	—	—
		Фидеры	$3 \times \varnothing 22$	—	0,371	0,910	0,275	—	—
	0	Горизонтальный элемент	12Б2	0,858	0,456	0,821	0,784	1,241	0,417

Примечание: w_m — средняя составляющая основной ветровой нагрузки; w_p — пульсационная составляющая основной ветровой нагрузки; w — основная ветровая нагрузка; W — основная ветровая нагрузка на верхней границе участка.

рина башен составляла 1,2; 1,8; 2,4; 3; 3,6 м. Данный тип конструктивного решения разработан для установки телекоммуникационного оборудования в городской черте.

Высота башни выбрана исходя из устоявшегося опыта проектирования опор сотовой связи в городе, для которых предельная высота около 42 м. Приведенные в работе результаты представлены в относительных единицах и могут быть экстраполированы на башни других высот.

Расчет конструкции башен и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) выполнены для следующих исходных данных (форма, габариты, район строительства):

ветровой район.....	3
тип местности.....	A
высота сооружения H , м.....	42
расчетная ширина сооружения b , м.....	1,2; 1,8; 2,4; 3; 3,6
высота типовой секции башни, h , м.....	6
форма сооружения.....	цилиндрическая
сечения элементов башен . из труб	
предельное отклонение верха башни, мм, $\Delta_{горизонт}$	420

Вантовая система с центральным стволом представляет собой пространственный предварительно напряженный стержень, переменной по высоте жесткости, состоящий из ствола и вант, равноудаленных на заданном диаметре. На верхнем участке ванты могут сходиться к поясу, на нижнем — отдаляться от ствола, тем самым повторяя эпюру изгибающих моментов, возникающих в стержне.

Предварительное натяжение в вантовых элементах выбирается таким, чтобы при работе сооружения под нагрузкой они были бы растянутыми. Иначе эти элементы выключаются из работы сооружения, т. е. уменьшается жесткость конструкции.

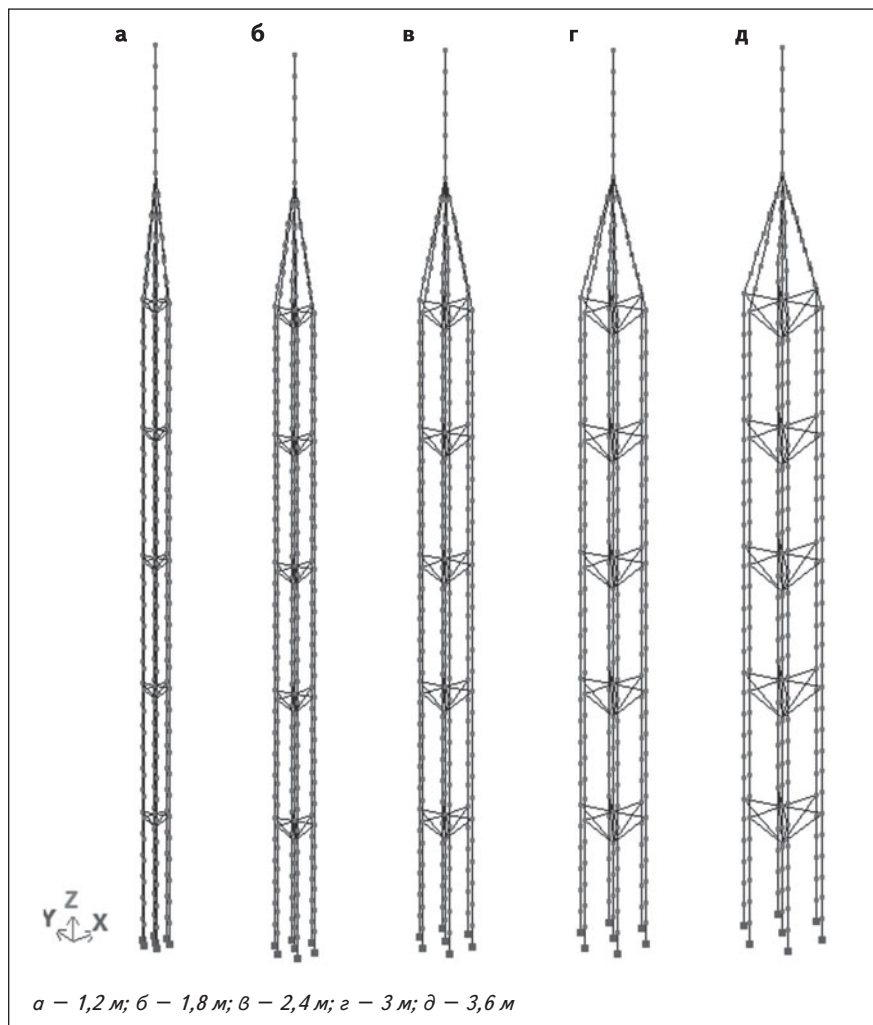


Рис. 2. Расчетные схемы в зависимости от ширины башни

Для оттяжек применяется круглая сталь с нарезной резьбой. В качестве анкерных устройств используются талрепы.

Конструктивная схема башни, распределение ветровой нагрузки по ее высоте и схема приложения ветровой нагрузки в расчетной схеме представлены на рис. 1. Воздействие ветровой нагрузки на башенные сооружения выбрано с учетом исследований Г. А. Савицкого и Э. Симиу [19, 20].

На башню действуют следующие нагрузки:

- собственный вес башни и вес технологического оборудования;
- ветровая нагрузка;
- нагрузка от предварительного напряжения в вантовых элементах;

- технологическая нагрузка: от оборудования общей массой 100 кг и площадью 2,9 м², которое находится на отметке 42 м; также вдоль ствола башни проходят три ветки фидеров, каждая $\varnothing 22$ мм.

Ветровая нагрузка определена согласно СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (табл. 1).

Исследование и анализ НДС башен

Башня по высоте была разделена на семь участков, в пределах которых жесткостные характеристики и распределение нагрузок принимались постоянными. Для создания линейки моделей для численных эксперимен-

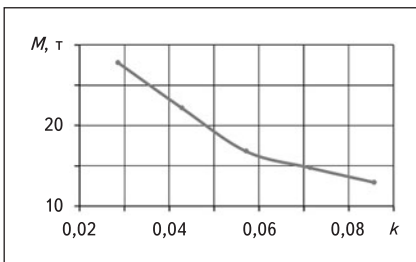


Рис. 3. Зависимость металлоемкости башни от отношения ее ширины к высоте

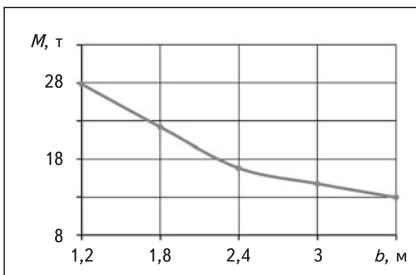


Рис. 4. Зависимость металлоемкости башни от ее ширины

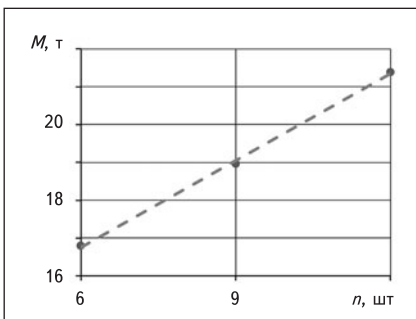


Рис. 5. Зависимость металлоемкости башни от количества вантовых элементов

тов использовали метод математического планирования экспериментов.

Моделирование башен выполнено в ПК «ЛИРА-САПР», расчет конструкций в котором реализован методом конечных элементов. Башни рассчитывали в нелинейной постановке. Для моделирования элементов ствола использован универсальный конечный элемент № 10. Подкосы балок площадок моделировались конечным элементом № 4. Для элементов тяжей, представляющих собой гибкие нити и работающих только на растяжение, применен геометрически нели-

2. Сечения элементов башен*

Элемент конструкции	Сечения элементов при ширине башни, м				
	1,2	1,8	2,4	3	3,6
Ствол	$\frac{\varnothing 180 \times 9}{\varnothing 450 \times 45}$	$\frac{\varnothing 180 \times 9}{\varnothing 402 \times 40}$	$\frac{\varnothing 180 \times 9}{\varnothing 377 \times 34}$	$\frac{\varnothing 180 \times 9}{\varnothing 351 \times 30}$	$\frac{\varnothing 180 \times 9}{\varnothing 325 \times 30}$
Раскосы	$\frac{\varnothing 45 \times 7}{\varnothing 76 \times 18}$	$\frac{\varnothing 50 \times 7}{\varnothing 70 \times 14}$	$\frac{\varnothing 54 \times 7}{\varnothing 68 \times 14}$	$\frac{\varnothing 60 \times 10}{\varnothing 70 \times 14}$	$\frac{\varnothing 63,5 \times 12}{\varnothing 73 \times 14}$
Горизонтальные элементы	1852	1452	1252	1252	1252
Ванты	$\frac{\varnothing 95}{\varnothing 120}$	$\frac{\varnothing 80}{\varnothing 105}$	$\frac{\varnothing 65}{\varnothing 90}$	$\frac{\varnothing 56}{\varnothing 85}$	$\frac{\varnothing 53}{\varnothing 75}$

* В числителе значения соответствуют сечению элемента для верхнего участка, в знаменателе — для нижнего участка.

нейный конечный элемент № 310 (нить). Предварительное натяжение тяжей моделировали с помощью специального конечного элемента № 308 (форкопф). Расчетные схемы башен приведены на рис. 2.

Ствол рассчитан, как сжатый изогнутый элемент, вантовые элементы — как центрально-растянутые элементы, подкосы — как центрально-сжатые элементы. Сечения элементов башен, определенные для данного конструктивного решения, даны в табл. 2.

Влияние на металлоемкость отношения ширины башни к ее высоте показано на рис. 3, и на рассматриваемом участке оно может быть аппроксимировано кривой вида:

$$M = -3,553 \cdot 10^3 + 3,285 \cdot 10^6 k - 1,12 \cdot 10^8 k^2 + 1,418 \cdot 10^9 k^3 - 6,209 \cdot 10^9 k^4, \quad (1)$$

где k — отношение ширины башни к ее высоте, $k = b/H$; M — металлоемкость конструкции, кг.

Характерный излом кривой наблюдается на участке со значением $k = 0,57$, которое можно считать минимальным рациональным отношением ширины башни к высоте по критерию материалоемкости.

Для исследования влияния количества вант на металлоемкость конструкции при выполнении условий первого и второго предельных состояний принимаем башню шириной 2,4 м ($k = 0,57$).

Влияние ширины башни на металлоемкость конструкции приведено на рис. 4. Из графика следует, что эта зависимость носит нелинейный характер. Также ширина башни 2,4 м выбрана из условия уменьшения размеров фундамента в плане. С увеличением ширины башни размеры фундамента увеличиваются, и возникает необходимость устройства сложных фундаментов (кольцевые и др.).

Рассмотрены варианты башен с использованием 6, 9, 12 вантовых элементов. Влияние количества вантовых элементов на общую массу сооружения имеет квазилинейный характер (т. е. нелинейный характер, близкий к линейному), о чем свидетельствует вид зависимости на рис. 5. При расчете башни с различным количеством вантовых элементов учитывалось уменьшение их сечений при условии обеспечения прочности вант. Влияние количества вант n на массу башни на рассматриваемом участке может быть аппроксимировано кривой вида:

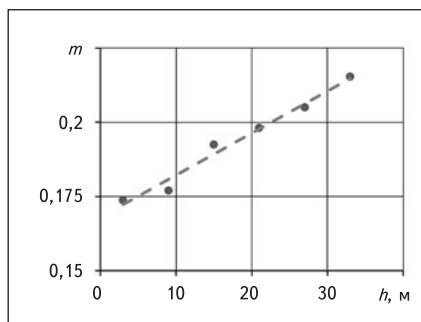


Рис. 6. Зависимость соотношения жесткостей m вантовых элементов и ствола от высоты башни

$$M = 1,322 \cdot 10^4 + 5,115 \cdot 10^2 n - 1,403 \cdot 10 n^2. \quad (2)$$

Для башни шириной 2,4 м с шестью вантовыми элементами на рассматриваемых участках изменение соотношения жесткостей вантовых элементов и ствола по высоте башни представлено на рис. 6.

Изменение соотношения жесткостей вантовых элементов и ствола по высоте башни имеет квазилинейный характер и может быть аппроксимировано:

• *кривой вида:*

$$m = 1,822 \cdot 10^{-1} - 4,53 \cdot 10^{-3} h + 6,646 \cdot 10^{-4} h^2 - 2,726 \cdot 10^{-5} h^3 + 3,697 \cdot 10^{-7} h^4; \quad (4)$$

• *или прямой вида:*

$$m = 1,682 \cdot 10^{-1} + 1,405 \cdot 10^{-3} h,$$

где m — соотношение жесткостей одного вантового элемента и ствола; h — отметка середины участка.

Изменение доли усилия предварительного натяжения от общего усилия в вантах по участкам башни шириной 2,4 м показано на рис. 7.

Сопоставление веса башен с

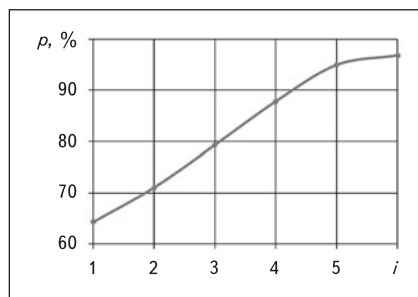


Рис. 7. Зависимость усилия преднапряжения от общего усилия в оттяжках по участкам башни i

различными решениями выполнено при соблюдении требований первого и второго предельного состояния.

Выводы

1. Предложено нетиповое конструктивное решение башен в виде многоярусной вантовой системы с центральным стволом ступенчато-переменной жесткости.

2. В результате проведенных расчетов определено, что наиболее экономичные решения по критерию минимальной металлоемкости — это опорные башни шириной более 2,4 м с отношением ширины к высоте от 0,06 до 0,09.

3. Изучены изменения напряжений и деформаций в исследуемых моделях башен. Представлены качественные и количественные характеристики изменения НДС башен при варьировании влияющих факторов, таких как ширина башни и число вантовых элементов. По результатам исследования получено влияние ширины башни на диаметры тяжей и ствола, влияние количества оттяжек на жесткость ба-

шен. Установлена зависимость предварительного натяжения в тросах от полного усилия, возникающего в них при действии расчетных сочетаний нагрузок. Усилия предварительного натяжения вант изменяются от 64 до 97 % значений полных усилий в них.

4. Получены зависимости общей массы конструкции от ширины сооружения и от количества вантовых элементов на участке разбиения. Минимальная металлоемкость установлена при шести оттяжках. Определена зависимость соотношения жесткостей вантовых элементов и ствола от высоты башни. Для башен высотой 42 м соотношение жесткостей изменяется в диапазоне от 0,175 до 0,21. Это дает возможность предварительно принимать сечения элементов в зависимости от исходных геометрических параметров.

5. Для снижения массы башни необходимо увеличить ширину основания двух нижних участков, чтобы конструктивной формой описать эпюру изгибающих моментов от действия ветровой нагрузки.

6. При дальнейших исследованиях следует выполнить расчеты на резонансное вихревое возбуждение, на гололедные нагрузки и определить оптимальный угол наклона вант на нижних участках башни.

Работы по исследованию данного конструктивного решения продолжают, в том числе и в части изучения влияния на стоимость конструктивного решения технологии изготовления и возведения (по критерию трудоемкости).

ЛИТЕРАТУРА

1. Перельмутер А. В. Основы расчета вантово-стержневых систем. М. : Стройиздат, 1969. 190 с.
2. Виноградов Г. Г. Расчет строительных пространственных конструкций. Л. : Стройиздат, 1990. 264 с.
3. Гайдаров Ю. В. Предварительно напряженные металлические конструкции. Новые виды и области применения. Л. : Стройиздат, 1971. 144 с.
4. Трофимович В. В., Пермяков В. А. Проектирование предварительно напряженных вантовых систем. Киев : Будівельник, 1970. 140 с.

5. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт. Статика и динамика. М. : Гос. изд-во лит. по вопросам связи и радио, 1953. 275 с.
6. Соколов А. Г. Опоры линий передач. Расчет и конструирование. М. : Госстройиздат, 1961. 172 с.
7. Воеводин А. А. Предварительно напряженные системы элементов конструкций. М. : Стройиздат, 1989. 304 с.
8. Солодарь М. Б., Кузнецова М. В., Плишкин Ю. С. Металлические конструкции вытяжных башен. Л. : Стройиздат, 1975. 179 с.
9. Ballio G., Mazzolani F. M. Theory and design of steel structures [Теория и проектирование стальных конструкций]. London, Taylor & Francis, 2008. 576 p.
10. Duggal S. K. Design of steel structures [Проектирование стальных конструкций]. New York, Tata McGraw-Hill Education, 2000. 821 p.
11. Trahair N. S., Bradford M. A., Nethercot D. A., Gardner L. The behaviour and design of steel structures [Поведение и проектирование стальных конструкций]. Florida, CRC Press, 2008. 512 p.
12. Szafran J. An experimental investigation into the failure of the mechanism of a full-scale 40 m high steel telecommunication tower [Экспериментальное исследование отказа полномасштабной стальной телекоммуникационной башни высотой 40 м] // Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 54. Pp. 131–145.
13. Szafran J., Juszczyk K., Kamicki M. Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state [Оценка надежности стальной решетчатой башни для предельного состояния работоспособности] // Lightweight structures in civil engineering contemporary problems. XXII LSCE–2016 Olsztyn, December 2, 2016. Poland, Olsztyn, University of Warmia and Mazury, pp. 92–102.
14. Szafran J., Rykaluk K. A full-scale experiment of a lattice telecommunication tower under breaking load [Полномасштабный эксперимент решетчатой телекоммуникационной башни при разрушающей нагрузке] // Journal of Constructional Steel Research. 2016. Vol. 120. Pp. 160–175.
15. Travanca R., Varum H., Real P. V. The past 20 years of telecommunication structures in Portugal [Телекоммуникационные конструкции в Португалии за последние 20 лет] // Engineering Structures. 2013. Vol. 48. Pp. 472–485.
16. Горохов Е. В., Пичугин С. Ф., Махинько А. В., Назим Я. В. Экспериментальное определение результирующих аэродинамических характеристик моделей зданий и сооружений // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 2. С. 85–95.
17. Jovašević S., Shah Mohammadi M. R., Rebelo C., Pavlović M., Veljković M. New lattice-tubular tower for onshore WEC – Part 1: Structural optimization [Новая решетчато-трубчатая башня для наземного преобразователя ветровой энергии. Ч. 1. Структурная оптимизация]. X international conference on recent advances in structural dynamics, EURO DYN 2017 // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 3236–3241.
18. Jovašević S., Rebelo C., Pavlović M., Correia J. A. Steel hybrid towers for WEC: geometry and connections in lattice structure [Стальные гибридные башни: геометрия и соединения в структуре решетки] // The international conference on wind energy harvesting, April 20–21. 2017. Pp. 317–321.
19. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. М. : Стройиздат, 1972. 110 с.
20. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М. : Стройиздат, 1984. 360 с.

REFERENCES

1. Perel'muter A. V. *Osnovy rascheta vantovo-sterzhnevnykh sistem* [Basics of calculating cable-rod systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969. 190 p. (In Russian).
2. Vinogradov G. G. *Raschet stroitel'nykh prostranstvennykh konstruksiy* [Calculation of building spatial structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1990. 264 p. (In Russian).
3. Gaidarov Yu. V. *Predvaritel'no napryazhennye metallicheskie konstruksii. Novye vidy i oblasti primeneniya* [Prestressed metal structures. New types and applications]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1971. 144 p. (In Russian).
4. Trofimovich V. V., Permyakov V. A. *Proektirovanie predvaritel'no napryazhennykh vantovykh sistem* [Designing of prestressed cable systems]. Kiev, Budevelnik Publ., 1970. 140 p. (In Russian).
5. Savitskii G. A. *Osnovy rascheta radiomacht. Statika i dinamika* [Basics of radio math calculation. Statics and dynamics]. Moscow, State Publishing House of Literature on Communications and Radio, 1953. 275 p. (In Russian).
6. Sokolov A. G. *Opory liniy peredach. Raschet i konstruirovaniye* [Supports the transmission line. Calculation and construction]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1961. 172 p. (In Russian).
7. Voevodin A. A. *Predvaritel'no napryazhennye sistemy elementov konstruksiy* [Prestressed system of elements of construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 304 p. (In Russian).
8. Solodar' M. B., Kuznetsova M. V., Plishkin Yu. S. *Metallicheskie konstruksii vytyazhnykh bashen* [Metal structures of exhaust towers]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1975. 179 p. (In Russian).
9. Ballio G., Mazzolani F. M. *Theory and design of steel structures*. London, Taylor & Francis, 2008. 576 p.
10. Duggal S. K. *Design of steel structures*. New York, Tata McGraw-Hill Education, 2000. 821 p.
11. Trahair N. S., Bradford M. A., Nethercot D. A., Gardner L. *The behaviour and design of steel structures*. Florida, CRC Press, 2008. 512 p.
12. Szafran J. An experimental investigation into the failure of the mechanism of a full-scale 40 m high steel telecommunication tower. *Engineering Failure Analysis*, 2015, vol. 54, pp. 131–145.

13. Szafran J., Juszczyk K., Kamicki M. Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state. *Light-weight structures in civil engineering contemporary problems. XXII LSCE –2016 Olsztyn*, December 2, 2016. Poland, Olsztyn, University of Warmia and Mazury, pp. 92–102.
14. Szafran J., Rykaluk K. A full-scale experiment of a lattice telecommunication tower under breaking load. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, vol. 120, pp. 160–175.
15. Travanca R., Varum H., Real P.V. The past 20 years of telecommunication structures in Portugal. *Engineering Structures*, 2013, vol. 48, pp. 472–485.
16. Gorokhov E. V., Pichugin S. F., Makhin'ko A. V., Nazim Ya. V. Experimental determination of the resultant aerodynamic characteristics of models of buildings and structures. *Metallicheskie konstruktsii*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 85–95. (In Russian).
17. Jovašević S., Shah Mohammadi M. R., Rebelo C., Pavlović M., Veljković M. New lattice-tubular tower for onshore WEC. Part 1. Structural optimization. X International conference on structural dynamics, EURO DYN 2017. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 199, pp. 3236–3241.
18. Jovašević S., Rebelo C., Pavlović M., Correia J. A. Steel hybrid towers for WEC: geometry and connections in lattice structure. *The international conference on wind energy harvesting*, April 20–21, 2017, pp. 317–321.
19. Savitskii G. A. *Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya* [Wind load on structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 110 p. (In Russian).
20. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Effects of wind on buildings and structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 360 p. (In Russian).

Для цитирования: Голиков А. В., Ситников И. Р. Напряженно-деформированное состояние башен с параллельными затяжками // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С. 43–50.

For citation: Golikov A. V., Sitnikov I. R. Stress-Strain State of Towers with Parallel Tightenings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2018, no. 7, pp. 43–50. (In Russian).