

УДК 624-074.5

Влияние ветровой нагрузки на конфигурацию решетчатых башен

Тищенко-Шаманская Н.В.

ООО «Укринсталкон им. В.Н. Шимановского», Украина

Аннотация. Рассматриваются беспоясные решетчатые металлические башни, предназначенные для поддержания на требуемой высоте радиотехнического, телевизионного или иного оборудования. Основными нагрузками на башню являются нагрузка от оборудования, собственный вес и ветровое воздействие. Задача заключается в минимизации теоретического веса башни. Искомые параметрами являются геометрические размеры башни при фиксированной ее высоте. В качестве ограничений выступают прочность и устойчивость стержней. Отклонения конструкции от вертикали в расчет не принимаются.

Анотація. Розглядаються безпоясні ґратчасті металеві башти, призначені для підтримання на необхідній висоті радіотехнічного, телевізійного або іншого устаткування. Основними навантаженнями на башту є навантаження від устаткування, власна вага і вітрова дія. Завдання полягає в мінімізації теоретичної ваги башти. Шуканими параметрами є геометричні розміри башти при фіксованій її висоті. Як обмеження виступають міцність і стійкість стрижнів. Відхилення конструкції від вертикалі в розрахунок не приймаються.

Abstract. In the paper latticed metal towers, intended for support on the required height of radiotechnical, televisional or another equipment are considered. The basic loads on the tower are loads from equipment, self weight and wind action. The task consists in minimization of theoretical weight of the tower. Required parameters are geometrical sizes of the tower if height is fixed. Durability and stability of bars come forward as limitations. There is no need take into account deviations of the construction from vertical line.

Ключевые слова: высотные сооружения, решетчатая башня, оптимизация, ветровая нагрузка.

Введение. Башня представляет собой решетчатую конструкцию, состоящую из узлов и стержней (рис. 1). Для конкретизации геометрии системы выберем правую декартову систему координат x, y, z . Начало системы координат совместим с вершиной башни так, чтобы ось z была направлена сверху вниз. Выберем m плоскостей, перпендикулярных оси z так, чтобы одна из них проходила через вершину башни, а остальные располагались ниже нее на определенном расстоянии одна от другой. Пронумеруем плоскости в направлении сверху вниз числами $0, 1, \dots, m-1$.

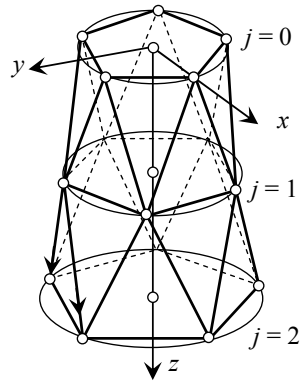


Рис. 1. Схема башни

Выбранные плоскости образуют ярусы, в которых располагаются узлы башни. Узлы соединены друг с другом стержнями двух типов: распорками, соединяющими соседние узлы одного яруса (тип 0) и раскосами, соединяющими узлы соседних ярусов (тип 1). Будем полагать, что стержни в узлах соединены шарнирно.

Ярус с номером j характеризуется координатой $z(j)$ ($j = 0, 1, \dots, m-1$). Проведем на каждой из плоскостей окружность радиуса R с центром, лежащим на оси z . Будем полагать, что окружность содержит n узлов, находящихся в вершинах правильного n -угольника. Такую башню будем называть n -гранной.

Все элементы башни можно разбить на m секций. Секцией с номером $j = 0, 1, \dots, m-1$ будем называть набор стержней, состоящих из n распорок, соединяющих узлы j -го яруса, и $2n$ раскосов, соединяющих узлы j -го и $j+1$ -го ярусов башни.

Дальнейшее изложение будет сопровождаться формулами. В отличие от обычной записи в формулах будем допускать не только односимвольные, но и многосимвольные обозначения величин, как это делается в алгоритмических языках. Многие рассматриваемые величины являются функциями номеров. Эти номера будем располагать после обозначений величин в скобках.

Усилия в стержнях. При решении задачи оптимизации башни возникает необходимость многократного определения усилий в ее стержнях. Для сокращения времени вычислений полезно иметь компактные замкнутые формулы.

При этом длины стержней определяются формулами:

$$\begin{aligned} l(j,0) &= R(j)2 \sin \gamma; \\ l(j,1) &= R(j)\sqrt{1+tr(j)^2 + tz(j)^2} - 2tr(j)\cos \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где обозначено:

$$\gamma = \frac{\pi}{n}; \quad tr(j) = \frac{R(j+1)}{R(j)}; \quad tz(j) = \frac{z(j+1) - z(j)}{R(j)}. \quad (2)$$

Замкнутые формулы для усилий в стержнях выведены в предположении, что можно ограничиться двумя членами разложения этих усилий в тригонометрические ряды по окружной координате. В этом приближении усилия в стержнях могут быть выражены через интегральные факторы – продольную силу, поперечные силы и изгибающие моменты в башне как в прямолинейном стержне. Учитывая то, что ветровая нагрузка может действовать в произвольном направлении, удалось получить замкнутые формулы для определения максимального и минимального усилий в каждом из видов элементов башни:

$$\begin{aligned} N \max(j,s) &= N0(j,s) + \sqrt{Nc(j,s)^2 + Ns(j,s)^2}; \\ N \min(j,s) &= N0(j,s) - \sqrt{Nc(j,s)^2 + Ns(j,s)^2}. \end{aligned} \quad (s = 0,1), \quad (3)$$

Величины, находящиеся в правой части равенств, вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} N0(j,0) &= Np0(j,0) + Nt0(j,0); \\ Nc(j,0) &= Npc(j,0) + Ntc(j,0); \\ Ns(j,0) &= Nps(j,0) + Nts(j,0); \\ N0(j,1) &= -\frac{l(j,1)}{2nR(j)tz(j)} Qz(j); \\ Nc(j,1) &= \frac{l(j,1)}{nR(j)^2 tz(j)} My(j); \\ Ns(j,1) &= \frac{l(j,1)}{nR(j)tr(j)\sin \gamma} \left(Qx(j) - \frac{1-tr(j)\cos \gamma}{R(j)tz(j)} My(j) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$N_{p0}(j, 0) = \frac{tr(j-1) - \cos \gamma}{2n \sin \gamma t z(j-1)} Q_z(j-1);$$

$$N_{pc}(j, 0) = \left(\left(1 - \frac{2 \cos \gamma}{tr(j-1)} \right) Q_x(j-1) - \frac{2My(j-1)}{Rtz(j-1)} \left(1 - \frac{\cos \gamma}{tr(j-1)} \right) \right) \frac{1}{2n \sin \gamma}; \quad (5)$$

$$N_{ps}(j, 0) = \left(\left(-tg \gamma + \frac{2 \sin \gamma}{tr(j-1)} \right) Q_x(j-1) + \frac{2tg \gamma My(j-1)}{Rtz(j-1)} \left(1 - \frac{\cos \gamma}{tr(j-1)} \right) \right) \frac{1}{2n \sin \gamma};$$

$$N_{t0}(j, 0) = \frac{1 - \cos \gamma tr(j)}{2n \sin \gamma t z(j)} Q_z(j);$$

$$N_{tc}(j, 0) = \left(Q_x + \frac{2}{Rtz(j)} (\cos \gamma tr(j) - 1) My \right) \frac{1}{2n \sin \gamma}; \quad (6)$$

$$N_{ts}(j, 0) = \left(-tg \gamma Q_x - \frac{2tg \gamma}{Rtz(j)} (\cos \gamma tr(j) - 1) \cdot My \right) \frac{1}{2n \sin \gamma};$$

$Q_z(j)$, $Q_x(j)$, $My(j)$ – продольная сила, направленная вдоль оси z , поперечная сила, направленная вдоль оси x и изгибающий момент относительно оси, параллельной оси y в башне как в прямолинейном стержне на уровне яруса с номером j ; $Q_z(j-1)$, $Q_x(j-1)$, $My(j-1)$ – то же на уровне яруса с номером $j-1$.

Здесь рассмотрен случай, когда ветер направлен вдоль оси x . Однако формулы (3) по информации о ветре лишь одного направления определяют максимальное и минимальное усилия в стержнях с учетом произвольного направления ветра.

Формулы (3) – (6) являются точными при принятых предположениях.

Площади поперечных сечений и ширины стержней. По полученным экстремальным усилиям надо уметь определять поперечные сечения стержней. В этой работе использован принцип подбора сечений из множества геометрически подобных. Характеристикой этого множества может служить удельный радиус инерции

$$\rho = \frac{r}{\sqrt{A}}; \quad (7)$$

где A – площадь поперечного сечения стержня; r – его радиус инерции.

Для реальных сечений значение ρ меняется в диапазоне $0,3 \div 0,6$, причем большие значения соответствуют более эффективным профилям. Можно

ввести безразмерный параметр α для площади поперечного сечения стержня A и безразмерный параметр ν для продольной силы в стержне N .

$$\alpha = A \left(\frac{\rho}{l} \right)^2; \nu = \frac{N}{Rr} \left(\frac{\rho}{l} \right)^2, \quad (8)$$

где l – расчетная длина стержня; Rr – расчетное сопротивление материала стержня.

Использование введенных безразмерных параметров позволяет получить прямые формулы для вычисления площадей сечений стержней. В этих формулах существенным образом используется зависимость коэффициента продольного изгиба от гибкости стержня. В работе рассмотрены два варианта такой зависимости. Первый из них более грубый, но позволяющий записать зависимость в аналитическом виде. Второй – более точный, базирующийся на аппроксимационных формулах работы [3], однако требующий применения итерационного процесса.

Первый вариант базируется на использовании принятого в этой работе принципа аппроксимации коэффициента продольного изгиба (рис. 2).

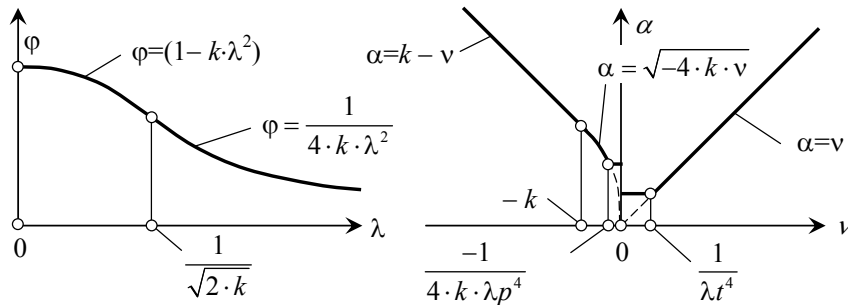


Рис. 2. Аппроксимация коэффициента продольного изгиба (слева);
график для прямого подбора сечений (справа)

Расчетные формулы этого варианта выглядят следующим образом:

$$\alpha = k - \nu \quad (\nu \leq -k); \quad \alpha = \sqrt{-4k\nu} \quad \left(-k < \nu \leq -\frac{1}{4k\lambda p^4} \right); \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{\lambda p^2} \quad \left(-\frac{1}{4k\lambda p^4} < \nu \leq 0 \right); \quad \alpha = \frac{1}{\lambda t^2} \quad \left(0 < \nu \leq \frac{1}{\lambda p^2} \right); \quad \alpha = \nu \quad \left(\frac{1}{\lambda^2} < \nu \right),$$

где λp – минимально допустимая гибкость сжатого стержня; λt – минимально допустимая гибкость растянутого стержня; k – эмпирический коэф-

коэффициент, определяемый из условий наилучшей аппроксимации коэффициента продольного изгиба и принимаемый из диапазона $0,5 \cdot 10^{-4} \div 0,7 \cdot 10^{-4}$.

Второй вариант использует аппроксимационные формулы из работы [3]:

$$\begin{aligned}\varphi &= 1 - 0,066\bar{\lambda}\sqrt{\bar{\lambda}} & (0 \leq \bar{\lambda} \leq 2,5); \\ \varphi &= 1,46 - 0,34\bar{\lambda} + 0,021\bar{\lambda}^2 & (2,5 < \bar{\lambda} \leq 4,5); \\ \varphi &= \frac{332}{\bar{\lambda}^2(51 - \bar{\lambda})} & (4,5 < \bar{\lambda}),\end{aligned}\tag{10}$$

где $\bar{\lambda}$ – условная гибкость, определяемая по формуле

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}};\tag{11}$$

λ – гибкость стержня; R_y – предел текучести; E – модуль упругости.

Для сбора ветровых нагрузок на элементы башни требуется знать ширину каждого элемента. Учитывая то, что сечения выбираются из серии геометрически подобных, любой размер сечения, в том числе и его ширина, пропорциональна корню квадратному из площади поперечного сечения. Коэффициент пропорциональности зависит от вида сечения и его удельного радиуса инерции. В частности, ширину (диаметр) трубчатого стержня можно вычислить по формуле

$$b = \sqrt{2A\left(\frac{1}{\pi} + 4\rho^2\right)},\tag{12}$$

где A – площадь поперечного сечения стержня; ρ – его удельный радиус инерции.

Ветровая нагрузка на элементы. В рассматриваемых башнях стержни могут быть произвольно ориентированы по отношению к ветру. Если стержень направлен вдоль вектора l , а ветровой напор вдоль вектора w , то вектор погонной нагрузки на стержень лежит в плоскости, параллельной векторам l и w и перпендикулярен стержню. При этом величина погонной нагрузки вычисляется по формуле

$$q = cx \cdot w \cdot b \cdot \sin \beta;\tag{13}$$

где cx – лобовой коэффициент обтекания, w – ветровой напор; b – ширина стержня; β – острый угол между направлениями ветра и стержня.

Исходя из этого правила, выведены формулы для определения ветровой нагрузки на стержни одной секции. При направлении ветра вдоль оси x равнодействующая ветровой нагрузки также направлена вдоль оси x . Ее значения $qx(j,0)$ для распорок и $qx(j,1)$ для раскосов яруса с номером j могут быть представлены формулами:

$$\begin{aligned} qx(j,0) &= Q0(j,0) \frac{n}{2}; \\ qx(j,1) &= Q0(j,1)n \left[1 + \frac{tz(j)^2 R(j)^2}{l(j,1)^2} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь $Q0(j,s)$ – ветровая нагрузка, действующая на стержень типа s , расположенный перпендикулярно потоку ветра. Она определяется формулой

$$Q0(j,s) = kd \cdot w10 Ch(h(s)) cx(j,s) l(j,s) b(j,s), \quad (s = 0,1), \quad (15)$$

где kd – коэффициент динамичности; $w10$ – ветровой напор на высоте 10 м; $Ch(h)$ – коэффициент возрастания ветрового напора по высоте на отметке h ; $cx(j,s)$ – коэффициент обтекания; $l(j,s)$ – длина стержня; $b(j,s)$ – ширина стержня.

Равнодействующая ветровой нагрузки находится на расстоянии

$$\zeta(j,s) \cdot R(j) \cdot tz(j) \quad (16)$$

от низа секции.

Безразмерный коэффициент уровня равнодействующей ветровой нагрузки $\zeta(j,s)$ для распорок и раскосов вычисляется по формулам:

$$\zeta(j,0) = 1; \quad \zeta(j,1) = \frac{1 + tz(j)^2 - tr(j) \cos \gamma}{1 + tr(j)^2 + 2tz(j)^2 - 2tr(j) \cos \gamma}. \quad (17)$$

Формулы (14) и (17) являются точными.

Оптимизационная задача. Исходные данные: HT – высота башни; n – число граней; Qo – вес поддерживаемого оборудования; So – наветренная площадь поддерживаемого оборудования; sxo – коэффициент обтекания оборудования; ho – возвышение центра наветренной площади оборудования над вершиной башни; $w10$ – ветровой напор на высоте 10 м над поверхностью земли; $Ch(h)$ – коэффициент возрастания ветрового напора по высоте (функция); kd – коэффициент динамичности; Rr – расчетное сопротивление материала; λp – минимально допустимая гибкость сжатого

стержня; λt – минимально допустимая гибкость растянутого стержня; ρt – максимально допустимый удельный радиус инерции сечения.

Основные неизвестные: $R(0)$ – радиус верхнего основания башни; m – число секций башни; $tr(j)$; $tz(j)$ – коэффициенты, определяемые формулами (2); $\rho(j)$ – удельные радиусы инерции сечений ($j = 0, 1, \dots, m-1$).

Вспомогательные неизвестные (вычисляемые на базе основных неизвестных): $R(j)$ – радиусы окружностей в ярусах; $z(j)$; – вертикальные координаты ярусов ($j = 1, 2, \dots, m$; $s = 0, 1$); $A(j,s)$ – площади поперечных сечений стержней ($j = 0, 1, \dots, m-1$; $s = 0, 1$); G – теоретический вес башни.

Целевая функция – теоретический вес башни, определяемый формулой

$$G = \sum_{j=0}^{m-1} qz(j); \quad (18)$$

где

– вес стержней секции j :

$$qz(j) = \gamma sn \sum_{s=0}^1 (s+1) l(j,s) A(j,s), \quad (j = 0, \dots, m-1); \quad (19)$$

– площадь сечения стержня:

$$A(j,s) = \alpha(j,s) \left[\frac{l(j,s)}{\rho(j)} \right]^2 \quad (j = 0, \dots, m-1; s = 0, 1); \quad (20)$$

$\alpha(j,s)$ – безразмерная площадь сечения, определяемая по формулам (9); γs – удельный вес материала стержней.

Ограничения – условия прочности и устойчивости, исходя из которых определяются площади поперечных сечений стержней $A(j,s)$, а также ограничения-неравенства:

$$\rho(j) \leq \rho t. \quad (21)$$

Ограничения по прогибам башни не учитываются.

Методы решения. В работе [1] А.Г. Соколов высказал идею о том, что в оптимальной башне верхние секции должны быть запроектированы так, чтобы ветровая нагрузка на них была бы по возможности меньше, а нижние секции – так, чтобы был минимальным их собственный вес. Уменьшения ветровой нагрузки на верхние секции следует добиваться даже ценой увеличения их собственного веса. Проектируя отдельную секцию, следует учитывать не только тот металл, который расходуется на

элементы этой секции, но и дополнительный металл нижележащих секций, который необходим для восприятия ветровой нагрузки на данную секцию. Уменьшение ветровой нагрузки на проектируемую секцию уменьшает вес нижележащей части башни. Поэтому может оказаться выгодным применение неоптимальных по весу секций, если они позволяют уменьшить действующую на них ветровую нагрузку.

Первое, что приходит в голову при реализации этой идеи, это уменьшение диаметров стержней в верхних секциях башни. Такое уменьшение, как правило, связано с увеличением их толстостенности, то есть с уменьшением удельных радиусов инерции стержней. Некоторые авторы рекомендуют даже выполнять верхние секции из прутков в надежде минимизировать ветровую нагрузку. К сожалению, попытки авторов этой работы снизить вес башни за счет уменьшения удельных радиусов инерции стержней верхних секций никогда не приводили к успеху.

Существует другой метод уменьшения ветровой нагрузки на секцию. Это уменьшение числа распорок на погонную единицу высоты башни. Такой эффект может быть достигнут за счет увеличения вытянутости секций башни.

Метод коэффициентов вытянутости. Если считать нормой секцию с минимальной погонной массой, то вытянутой секцией можно считать секцию, высота которой получается путем умножения высоты нормальной секции на коэффициент вытянутости, большой единицы. Радиусы оснований секций остаются при этом без изменения. Будем полагать, что этот коэффициент $k(z)$ является функцией координаты z . Этот коэффициент у основания башни должен быть близок к единице и увеличивается с увеличением отметки секции. Суть метода заключается в нахождении такой функции $k(z)$, которая доставляет башне минимальный вес. Аппроксимируя эту функцию полиномом, мы приводим задачу к поиску нескольких чисел – коэффициентов этого полинома. В качестве математического аппарата использовалась стандартная программа минимизации функции нескольких переменных.

При этом функция $k(z)$ аппроксимировалась полиномом второй степени:

$$k(z) = kt - \frac{3kt - 4ks + 1}{H}z + \frac{2kt - 4ks + 2^2}{H^2}z^2. \quad (22)$$

Данная форма представления полинома была выбрана с тем, чтобы коэффициенты kt и ks имели физический смысл. А именно, коэффициент kt – это коэффициент вытянутости при $z = 0$, а ks – коэффициент вытянутости при $z = 0,5 \cdot H$.

Были выполнены оптимизационные расчеты серии башен четырех-, шести- и восьмигранных высотой от 100 м до 1000 м. Материал конструкций башен – сталь с плотностью $7,85 \text{ т/м}^3$ и расчетным сопротивлением $2,4 \cdot 10^4 \text{ тс/м}^2$. Предельная гибкость сжатых элементов принята 120, растянутых – 200. Удельный радиус инерции усреднен и для всех элементов равен 0,6. Радиус описанной окружности для верхнего основания 0,4 м.

При сборе ветровых нагрузок на элементы башни были приняты следующие исходные данные: аэродинамический коэффициент – 0,8; коэффициент динамичности – 1,4.

На башне установлено условное оборудование, масса которого составляет 1 т. Оно расположено на высоте 4-х м от верхнего уровня башни. Ветровая площадь оборудования принята равной 8 м^2 , с аэродинамическим коэффициентом 1.

Основные результаты расчетов приведены в таблице 1. Как следует из таблицы, теоретическая масса башни оказывается весьма небольшой. Это объясняется, по-видимому, тем, что башня несет лишь небольшое антенное оборудование на ее верху, а также отсутствием площадки и конструктивных элементов. Обращает на себя внимание то, что оптимальные башни очень вытянуты в высоту.

Таблица 1

Высота башни, м	Диаметр основания, м			Число ярусов			Теоретическая масса башни, т		
	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$
100	2,985	3,62	4,3	46	57	64	19,561	19,474	19,763
200	4,73	5,81	6,96	57	68	78	94,162	97,37	101,48
400	7,88	9,73	11,67	70	83	93	502,77	534,96	567,0
600	10,77	13,32	15,94	78	92	102	1400,0	1510,0	1610,0
800	13,55	16,77	20,00	84	98	110	3000,0	3230,0	3440,0
1000	16,11	20,09	23,96	87	103	115	5450,0	5890,0	6260,0

Отношение высоты башни к диаметру основания при шести гранях меняется в пределах от 28 до 50. С увеличением числа граней масса башни увеличивается. Причину таких результатов можно объяснить тем, что многогранные башни содержат в своем составе много элементов и, несмотря на то, что эти элементы более короткие и имеют меньшие диаметры, суммарная ветровая нагрузка на башню значительно увеличивается.

В табл. 2 для всех башен приведены число элементов и суммарная ветровая нагрузка на башню. С увеличением числа граней резко увеличивается число элементов башни. При переходе от четырехгранной башни к шестигранной число элементов увеличивается не в полтора раза,

как можно было бы прогнозировать, а в 1,7–1,8 раза. При переходе от четырехгранной башни к восьмигранной число элементов увеличивается не в два раза, а примерно в 2,6 раза.

Таблица 2

Высота башни, м	Число элементов			Суммарная ветровая нагрузка, т		
	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$
100	556	1032	1552	7,26	9,35	11,57
200	688	1230	1880	16,12	22,09	28,04
400	844	1500	2240	42,30	58,19	74,07
600	940	1662	2456	77,33	106,37	134,55
800	1012	1770	2648	121,36	167,33	209,97
1000	1048	1860	2768	170,24	239,46	298,75

Что касается суммарной ветровой нагрузки, то при переходе от четырехгранной башни к шестигранной ветровая нагрузка увеличивается в 1,4 раза. При переходе от четырехгранной башни к восьмигранной ветровая нагрузка увеличивается примерно в 1,75 раза.

Масса башен с увеличением числа граней тоже возрастает, но в значительно меньшей степени. Например, для башни высотой 1000 м при переходе от четырехгранной башни к восьмигранной это увеличение составляет 15 %.

Метод учета массы нижележащих секций. Рассмотрим более подробно второй метод оптимизации, использованный в работе. При этом заметим, что важным является показатель погонного веса башни в окрестности каждой ее отметки. Интегрируя этот показатель по высоте башни, получим ее суммарную массу. Другой важный показатель – это погонная ветровая нагрузка на башню в окрестности той же отметки. От этого показателя зависит масса нижележащих секций башни. Если бы можно было добиться, чтобы оба эти показателя достигали минимума, то такая башня была бы оптимальной. На самом деле минимизация одного из этих показателей влечет за собой увеличение другого. Задача заключается в том, чтобы найти такое их соотношение, при котором суммарная масса башни становится минимальной.

Для нахождения их рационального соотношения важно знать насколько утяжеляет нижележащую часть башни каждая единица ветровой нагрузки, приложенная на рассматриваемой отметке. Тогда, определяя параметры рассматриваемой секции, можно было бы учитывать увеличение массы нижележащей части башни за счет увеличения ветровой нагрузки на данную секцию. Как показывают численные эксперименты, таким путем удается получить еще более легкую башню.

Рассмотрим более подробно размеры утяжеления нижележащей части башни от единицы ветровой нагрузки, приложенной на рассматриваемой отметке. Для этого воспользуемся предыдущим методом. В результате экспериментального проектирования башен по этому методу, с приложением дополнительной нагрузки на избранных отметках, были получены данные утяжеления нижележащей части башни, приведенные в таблице 3. Размерность полученных добавок – т/тс.

Таблица 3

Число граней	Высота башни, м	Отметка приложения единичной силы				
		0,2·H	0,4·H	0,6·H	0,8·H	H
n = 4	100	0,122	0,504	1,187	2,279	4,039
	200	0,311	1,305	3,161	6,337	12,221
	400	0,750	3,235	8,079	16,903	35,203
	600	1,245	5,420	13,823	29,981	66,018
	800	1,757	7,743	20,089	44,622	104,575
	1000	2,292	10,207	26,902	62,423	153,94
n = 6	100	0,100	0,412	0,972	1,877	3,388
	200	0,250	1,048	2,541	5,140	10,222
	400	0,594	2,552	6,378	13,459	29,075
	600	0,969	4,214	10,855	23,874	53,152
	800	1,428	6,169	15,959	35,726	83,041
	1000	1,838	8,126	21,411	49,072	119,009
n = 8	100	0,087	0,359	0,846	1,644	3,056
	200	0,213	0,888	2,158	4,388	9,031
	400	0,507	2,166	5,389	11,463	25,954
	600	0,839	3,628	9,239	20,236	47,796
	800	1,179	5,152	13,323	29,946	72,689
	1000	1,535	6,820	17,944	41,100	100,746

Интерполируя данные этой таблицы, рассчитанные только для пяти уровней приложения нагрузки, можно получить величины утяжеления для любой отметки ее приложения. На основании этих данных можно оптимизировать каждую панель башни, выбирая в качестве целевой функцию

$$C = \frac{M + W \cdot DM}{R \cdot tz}, \quad (23)$$

где M – масса яруса; W – ветровая нагрузка на ярус; DM – утяжеление нижележащей части башни на каждую единицу ветровой нагрузки, $R \cdot tz$ – высота яруса.

Увеличение высоты яруса влечет за собой увеличение погонной массы этого яруса, но приводит к уменьшению погонной ветровой нагрузки, а вместе с ней и снижению утяжеления нижележащей массы башни.

Уменьшение высоты яруса в определенных пределах приводит к уменьшению его погонной массы, но увеличивает погонную ветровую нагрузку на ярус и утяжеляет нижнюю часть башни. Минимум целевой функции C свидетельствует о том, что достигнуто равновесие в этом процессе и получены оптимальные параметры каждой секции.

Величины утяжелений нижней части башни были получены для башен с неоптимальными параметрами и являются приближенными. Можно организовать итерационный процесс, уточнив эти данные на основе использования геометрической схемы башни, полученной на предыдущем приближении. Такой процесс можно будет остановить, когда снижение веса башни на следующей итерации будет пренебрежимо малым.

Расчеты показывают, что для этого достаточно двух-трех итераций. После первой итерации были получены данные, приведенные в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Высота башни, м	Диаметр основания, м			Число ярусов			Теоретическая масса башни, т		
	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$
100	3,058	3,695	4,295	43	52	59	18,415	18,239	18,49
200	4,860	5,927	7,035	54	65	74	88,072	90,853	94,38
400	8,021	9,935	11,848	65	78	88	468,72	498,497	528,48
600	10,929	13,576	16,250	73	86	97	1302,62	1405,66	1497,75
800	13,678	17,003	20,379	78	91	103	2745,82	2985,38	3191,16
1000	15,848	19,901	24,348	81	96	108	4998,38	5421,68	5796,80

Сравнивая таблицы 4 и 1, замечаем, что достигнуты более рациональные решения, приводящие к снижению массы башен. Для башен высотой 100–200 м снижение массы составляет 6 %, 400–600 м – 7 %, 800–1000 м – 7,5–8 %, Диаметр основания при этом увеличивается на 1 %, а число ярусов уменьшается примерно на 5–7 %.

Наиболее важной причиной снижения расхода стали на башню является снижение ветровой нагрузки. Как показывает сравнение таблиц, суммарная ветровая нагрузка на башню значительно снижается. Для башен высотой 100–200 м это снижение составляет 6–9 %, 400–600 м – 6,5–12,5 %, 800–1000 м – 10–16 %. Число ярусов и элементов при этом тоже снижается.

Обращает на себя внимание существенная зависимость ветровой нагрузки на башню от числа ее граней. Так по сравнению с четырехгранной башней шестигранная собирает на себя на 30–40 %, а восьмигранная – на 65–85 % больше ветровой нагрузки. Это означает, что при увеличении числа граней диаметры элементов башни меняются незначительно. Пытаясь увеличить число элементов башни в одном сечении, мы тем самым увеличиваем

нагрузку на башню и не получаем существенного уменьшения усилий в элементах.

Таблица 5

Высота башни, м	Число элементов			Суммарная ветровая нагрузка, т		
	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$
100	520	942	1424	6,59	8,71	10,74
200	652	1176	1240	15,13	20,76	26,35
400	784	1410	2120	38,03	53,80	69,25
600	880	1554	2336	67,63	96,08	124,54
800	940	1644	2480	102,58	145,81	189,43
1000	976	1734	2600	142,69	203,62	263,04

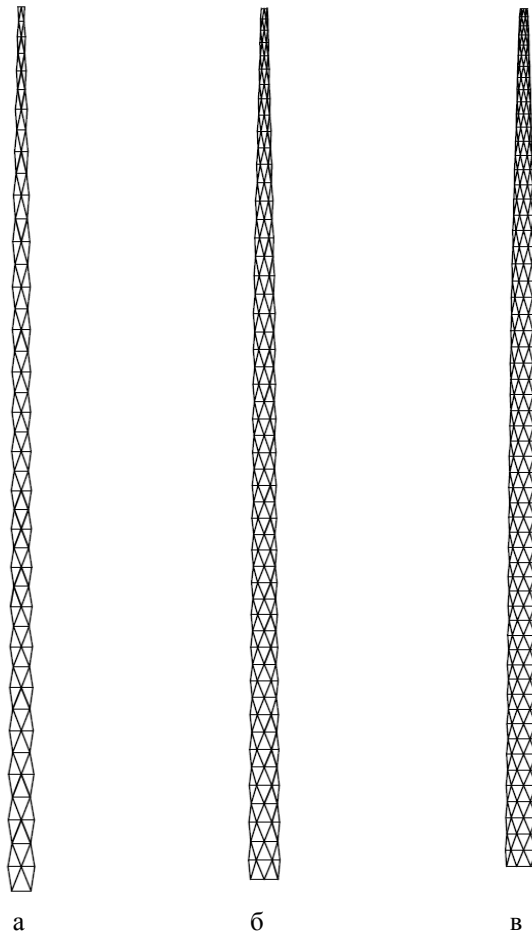


Рис. 3. Схема башен высотой 100 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

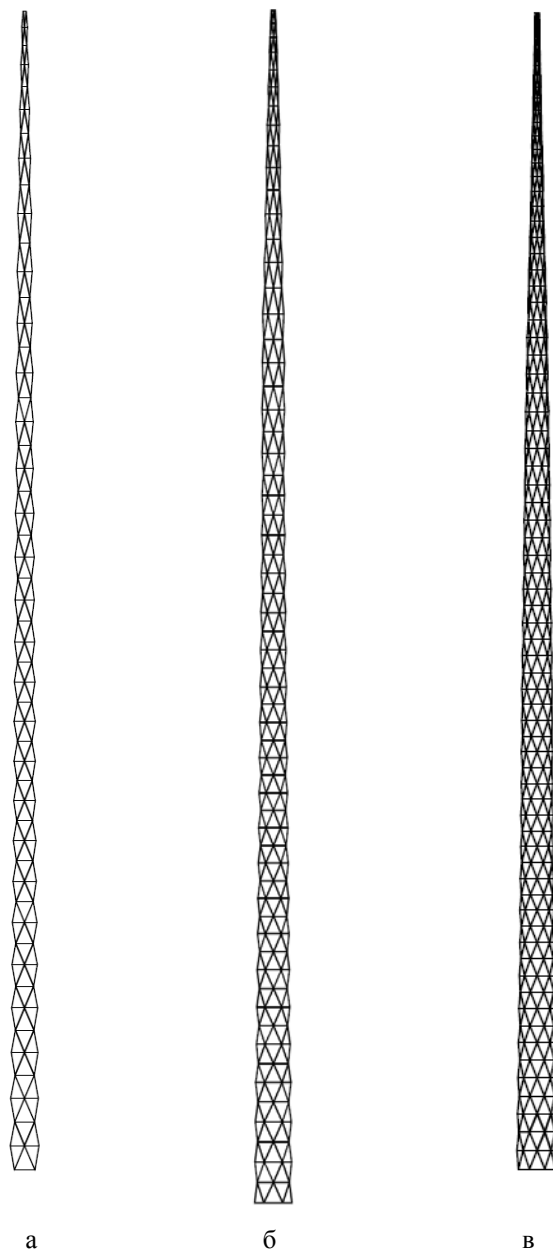


Рис. 4. Схема башен высотой 200 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

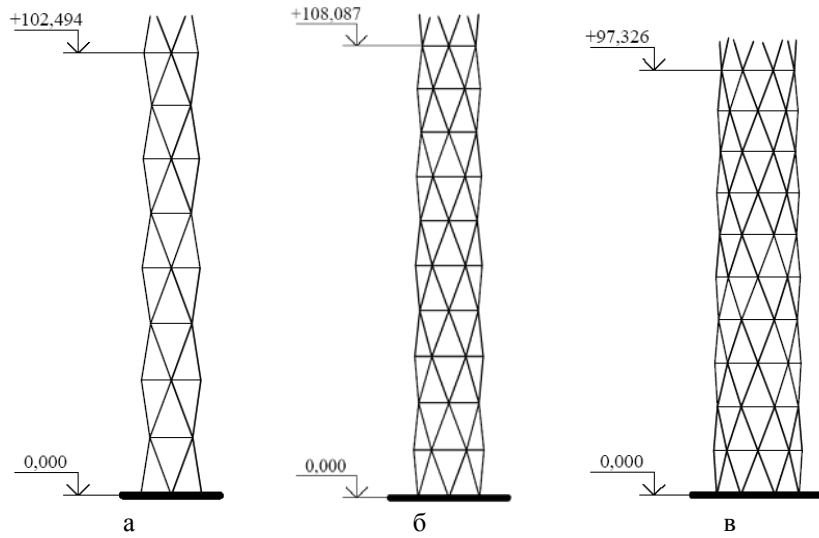


Рис. 5. Схема низа башен высотой 800 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

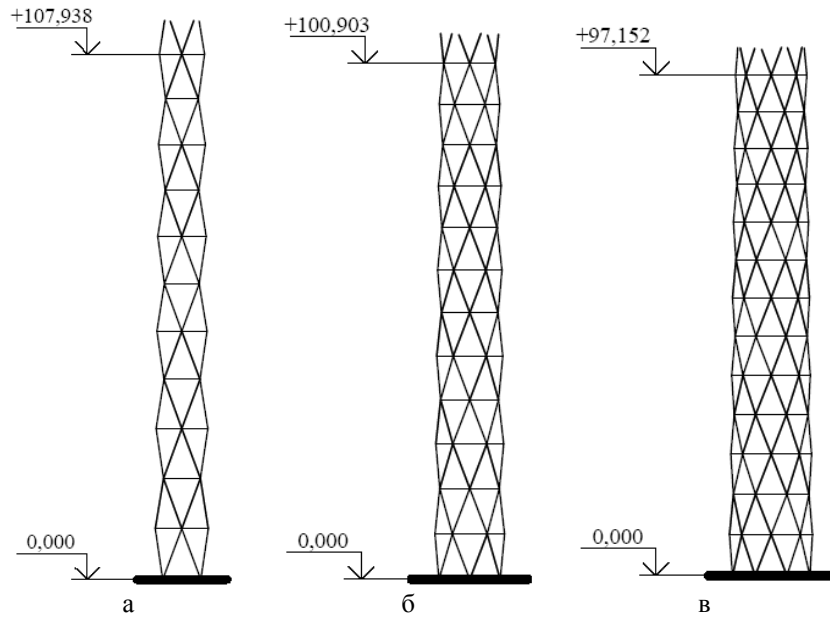


Рис. 6. Схема низа башен высотой 600 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

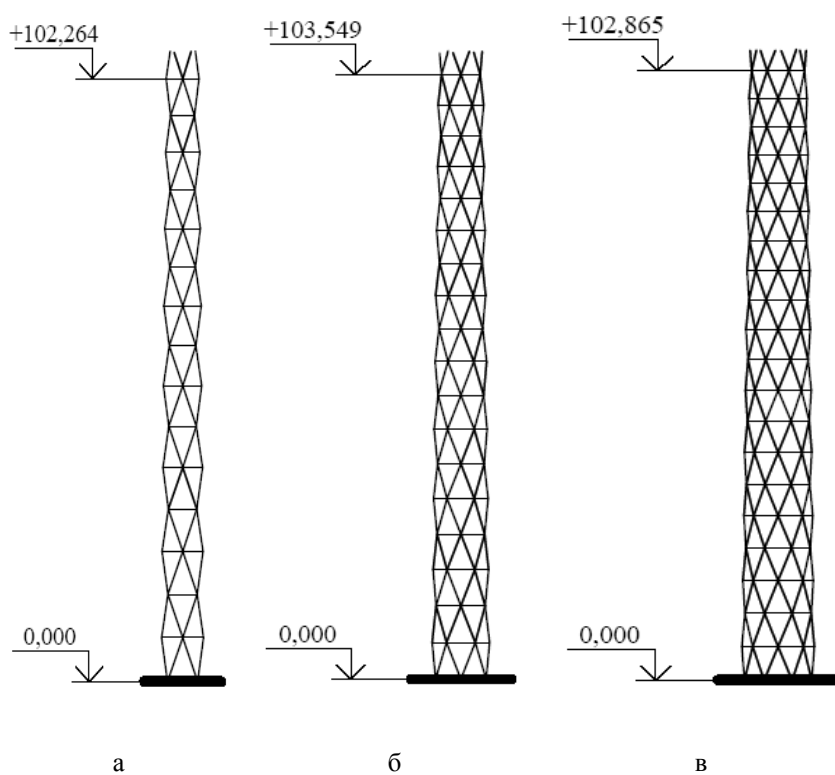


Рис. 7. Схема низа башен высотой 400 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

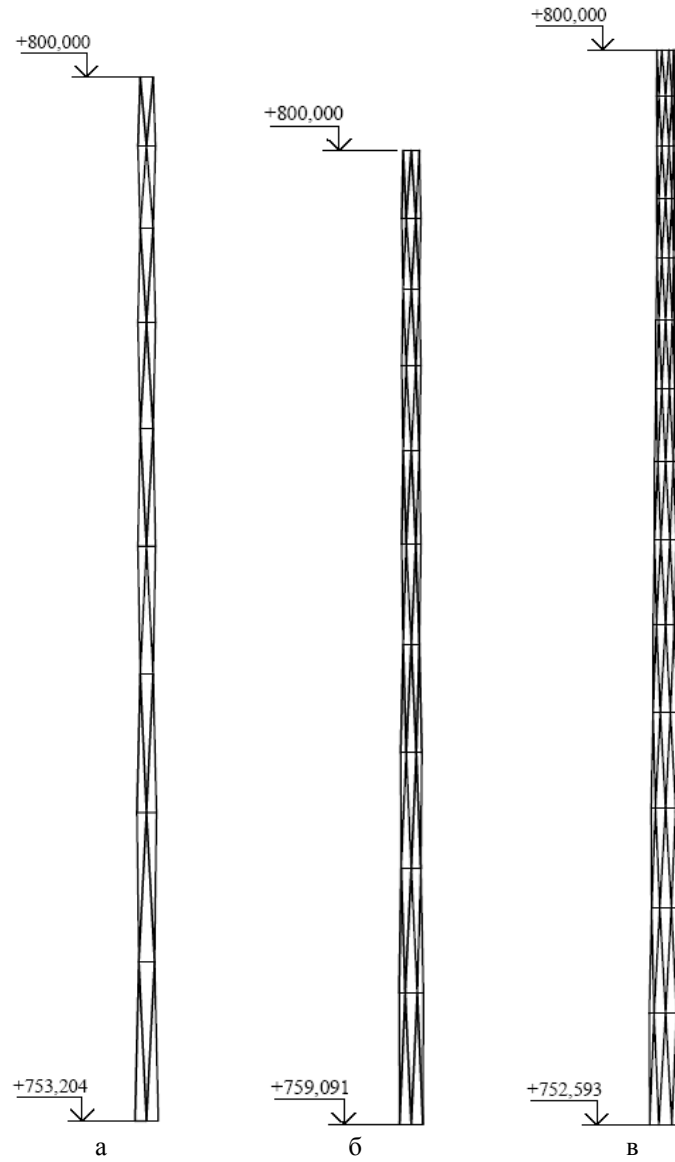


Рис. 8. Схема верха башен высотой 800 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

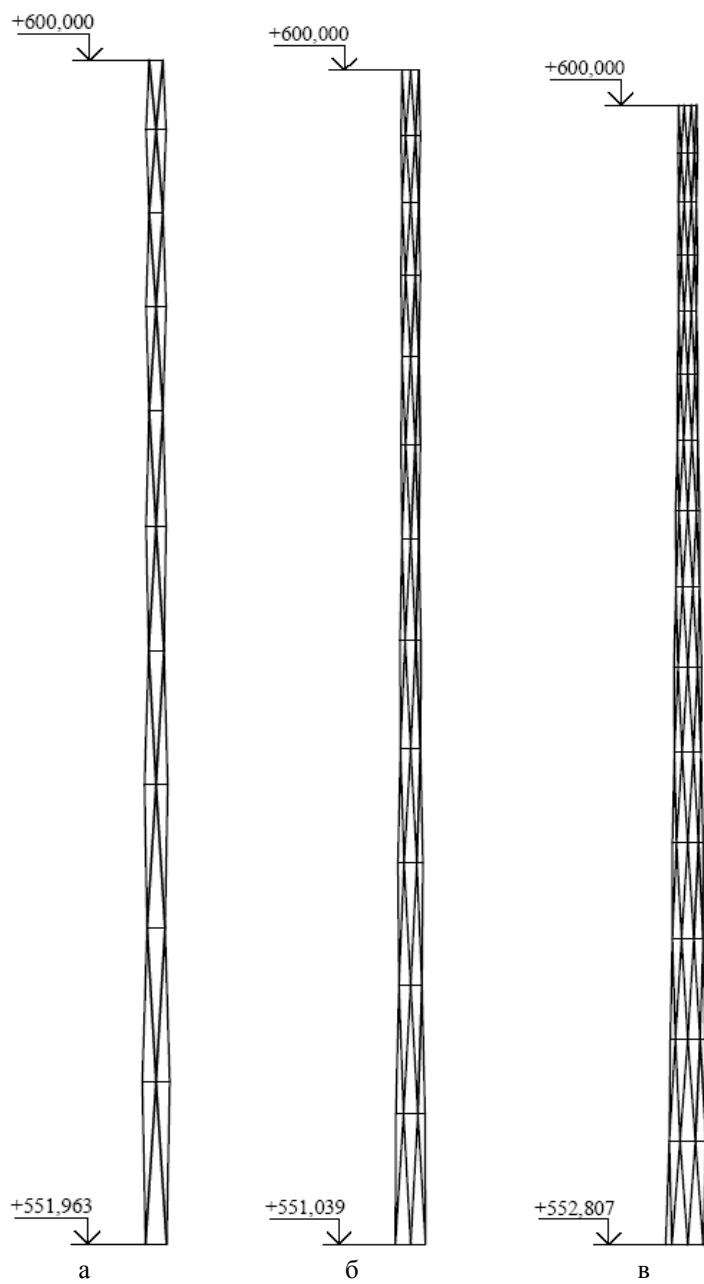


Рис. 9. Схема верха башен высотой 600 м:
а – 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

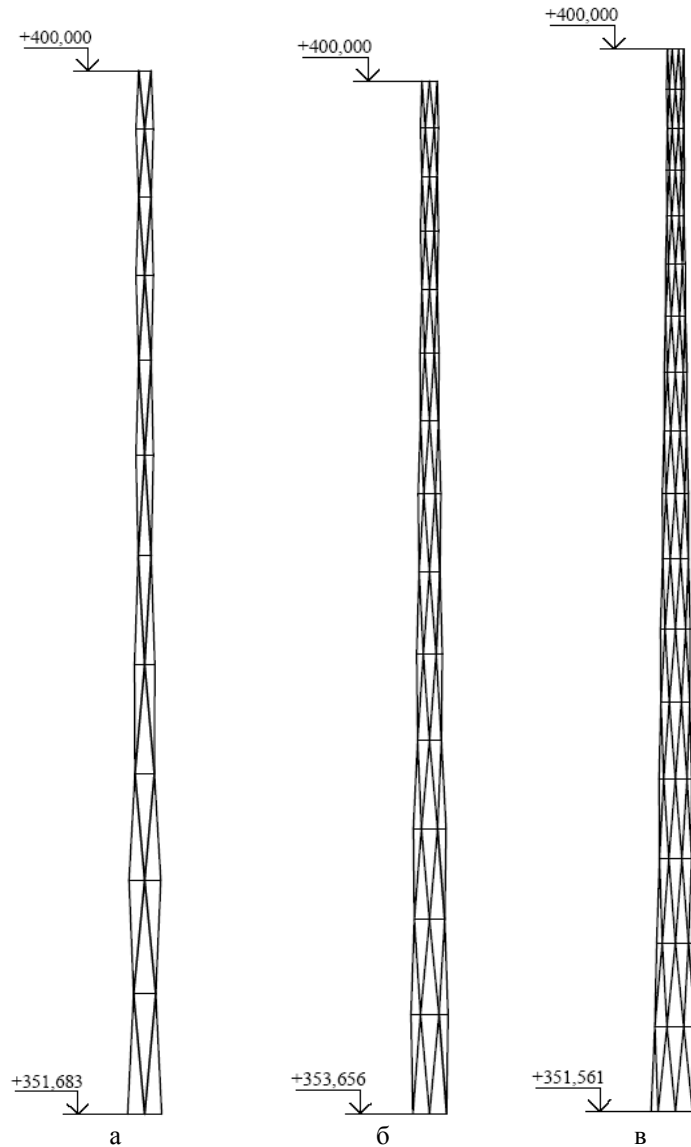


Рис. 10. Схема верха башен высотой 400 м:
а 4-гранная; б – 6-гранная; в – 8-гранная

На рис. 3–10 показаны схемы башен высотой от 100 до 800 м. Из рисунков видно, что оптимальные башни сильно вытянуты в высоту. Это свидетельствует о том, что ветровая нагрузка сильно влияет на оптимальную форму башни. Соотношение высоты ярусов к их диаметрам в верхней части башен достаточно велико, что связано с необходимостью

уменьшения ветровой нагрузки. Более того, в верхней части башни диаметры нескольких секций меньше диаметра верхнего основания башни, заранее заданного равным 0,8 м. Это также результат того, что ветер на верхние секции башни сильно влияет на ее вес и ветровая нагрузка любыми средствами должна быть минимизирована.

Нижние части башен имеют ярусы с привычными соотношениями размеров, хотя их диаметры очень малы по сравнению с высотой башни. Это во многом связано с тем, что при оптимизации башен не учтены расходы на фундаменты. В противном случае башни заметно бы уширялись в нижней части.

Выводы

Поставлена задача оптимизации формы беспоясных металлических башен, учитывающая взаимное влияние конструктивной формы башни и ветровой нагрузки.

Получены замкнутые формулы для сбора ветровой нагрузки на секции башни, определения усилий в элементах башни, подбора сечений элементов башни и вычисления их диаметров при любом числе граней.

Предложены два эвристических метода решения поставленной задачи: метод коэффициентов вытянутости и метод учета влияния массы нижележащих секций.

На основании этих методов исследованы беспоясные башни в диапазоне высот от 100 до 1000 м.

Вычислены рациональные отношения размеров секций в зависимости от их расположения по высоте башни и диаметра основания башни к ее высоте.

В верхней части оптимальных башен панели вытянуты по высоте, а у основания имеют привычные соотношения размеров. Отношение высоты панели к ее диаметру достигает у вершины башни 3, а у основания башни составляет 0,84.

Показано, что характерной особенностью беспоясных башен является большое отношение высоты башни к диаметру основания, которое меняется в пределах от 22 до 60.

Как правило, более легкими оказываются башни с меньшим числом граней, поскольку ветровая нагрузка существенно увеличивается с увеличением их числа. Так по сравнению с четырехгранной башней шестигранная собирает на себя на 40 %, а восьмигранная – на 80 % больше ветровой нагрузки.

Учет взаимного влияния конструктивной формы башни и ветровой нагрузки свидетельствует о том, что наиболее выгодными являются четырехгранные башни с большими отношениями высоты к ее диаметру.

Литература

- [1] Соколов А.Г. Металлические конструкции антенных устройств. –М.: Стройиздат, 1971. – 240 с.
- [2] Остроумов Б.В. (2009), Совершенствование конструктивных форм высотных сооружений на основе экспериментально-теоретических исследований их взаимодействия с ветровым потоком. Труды института к 100-летию со дня рождения академика Н.П. Мельникова. Эдисон. – С. 61–85.
- [3] Пособие по проектированию стальных конструкций (к СниП II-23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989, – 148 с.
- [4] Соколов А.Г. Выбор оптимальных решений телевизионных опор большой высоты. «Материалы по строительным конструкциям». – № 1, Проектстальконструкция, Госстройиздат, 1957.
- [5] Гордеев В.Н., Гринберг М.Л., Кондра М.П. Оптимальные параметры решетчатых башен симметричной структуры // Промышленное строительство, 1985. – № 9. – С. 12–14.
- [6] Гордеев В.Н., Борисенко Ю.С., Гринберг М.Л., Кондра М.П. Оптимизация геометрических параметров строительных металлоконструкций. В кн. «Основные направления развития стальных конструкций и современные методы их изготовления»: Заключительный отчет симпозиума АИПК. – М.: 1978. – Т. 3. – С. 47–56.
- [7] Гордеев В.Н., Кондра М.П. О выборе рациональных схем решетчатых башен. Сб. «Строительные конструкции», вып. XXVII. – Киев, «Будівельник», 1976. – С. 135–137.

Надійшла до редколегії 25.11.2011 р.