

УДК 624.074.5

А. В. Голиков^а, Д. В. Веремеев^б

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *Санкт-Петербургский горный университет*

ОБОБЩЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ КОМПОНОВКИ И НАЗНАЧЕНИЯ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХГРАННЫХ РЕШЕТЧАТЫХ БАШЕН

В современном мире именно быстровозводимые и дешевые решетчатые башни с гарантированным сроком эксплуатации должны обеспечивать высокое качество связи. Для поддержания стабильного уровня сигнала между потребителями требуется большая насыщенность территории подобными сооружениями. В статье систематизированы принципы компоновки габаритных размеров башен на основе результатов анализа данных работы под нагрузкой башен с сечениями из труб при применении различных типов решеток, используемых в практике строительства. С целью уточнения существующих аналитических зависимостей назначения габаритных размеров башен произведены аналитический и численный расчеты. Выполнено варьирование габаритных размеров с целью поиска наиболее рациональных форм. Результаты исследований представлены в относительных параметрах, что позволяет инженеру руководствоваться ими на стадии разработки компоновочных схем башен. Данные могут быть полезны при определении предварительной стоимости строительства.

К л ю ч е в ы е с л о в а: опора сотовой связи, стальная решетчатая башня, рациональные геометрические размеры, трехгранные башни, напряженно-деформированное состояние, нагрузки, усилия, деформации, принципы компоновки.

Целью работы является совершенствование принципов компоновки габаритных размеров трехгранных решетчатых башен на основе обобщения и корреляции данных серии результатов численных и аналитических экспериментов.

Задачи, разработанные для решения поставленной цели:

- выполнить критический анализ существующего опыта расчета и проектирования решетчатых башен, систематизировать существующие принципы компоновки габаритных размеров;
- проанализировать существующие типы решеток;
- выполнить аналитические расчеты решетчатых башен с различными типами решеток;
- выполнить сравнение результатов расчета башен аналитическим методом и численным методом с использованием МКЭ;
- исследовать трехгранные башни с наиболее распространенными в практике типами решеток для определения рациональных габаритных размеров;
- оценить эффективность башен по критерию металлоемкости;
- обобщить принципы компоновки габаритных размеров трехгранных решетчатых башен в виде инженерной методики.

Объектом исследования данной работы являются трехгранные башни под опоры теле-, радио- и мобильной связи, выполненные со стержнями из труб при варьировании габаритных размеров и типов решетки.

Методы. Основные зависимости данной работы получены аналитически и скорректированы данными численных экспериментов с использованием

программно-вычислительных комплексов, работа которых основана на методе конечных элементов (МКЭ). Для создания линейки моделей, применяемых в численных экспериментах, применялся метод математического планирования.

Предмет исследования — напряженно-деформированное состояние (НДС) пространственной фермы консольного типа.

Обзор существующего опыта назначения габаритных размеров элементов башен

В практике строительства наибольшее распространение среди различных типов башен получили четырехгранные и трехгранные башни со стальной решеткой. Башни предназначены для размещения оборудования на технологических отметках. Доступ по высоте башни обеспечивается устройством лестниц и площадок.

Основным преимуществом башен можно считать их малую площадь застройки при достаточно большой высоте, что обусловлено особенностью данной конструкции, при которой ширина основания в разы меньше общей высоты башни. Данное преимущество позволяет значительно чаще использовать башни, в сравнении с мачтами на оттяжках, в условиях городской застройки, даже с учетом большей дороговизны башен. Данный факт достаточно подробно описан в книге В. Ф. Павловского, М. П. Кондра [1], также исследования в данном направлении производились в работе Ю. В. Краснощекова [2].

Основной классификацией данных конструкций является их разделение: по типу сечения на трех-, четырех- и многогранные; по виду очертания на пирамидальные и призматические; а также с переломом и без перелома граней по высоте. Данная классификация подробно описана в книге В. В. Горева [3] и статье А. Г. Юрьева, С. В. Клюева и А. В. Клюева [4].

Более распространенными по типу сечения в данный момент являются четырехгранные башни в сравнении с трехгранными. Данное преимущество обусловлено возможностью изготовления четырехгранных башен из уголков, однако по показателям экономической эффективности, а следовательно, и экономии металла трехгранные башни показывают лучшие результаты, также данные башни не требуют постановки диафрагм. Данный факт подтверждают в своих трудах такие ученые, как Ю. И. Кудишин и др. [5], Н. С. Стрелецкий [6], Р. В. Мелихов [7] и др.

Решетчатая башня состоит из таких элементов, как раскосы, распорки и пояса. Основными внутренними усилиями, возникающими в башне, являются продольные усилия, моменты и поперечные усилия. Так, продольное усилие и момент башни совместно воспринимаются поясом данной пространственной фермы, а поперечные усилия воспринимаются решеткой. Основными типами решеток, в свою очередь, являются крестовая (рис. 1, *a*), треугольная (рис. 1, *б*), треугольная с распоркой (рис. 1, *в*), полураскосная (рис. 1, *г*), ромбическая (рис. 1, *д*) и крестово-ромбическая (рис. 1, *е*). О данных типах решеток, а также о применимости различных схем решеток написано в трудах В. В. Горева [3].

Вопросы распределения усилий в башне в зависимости от типа решеток были рассмотрены в работе [8].

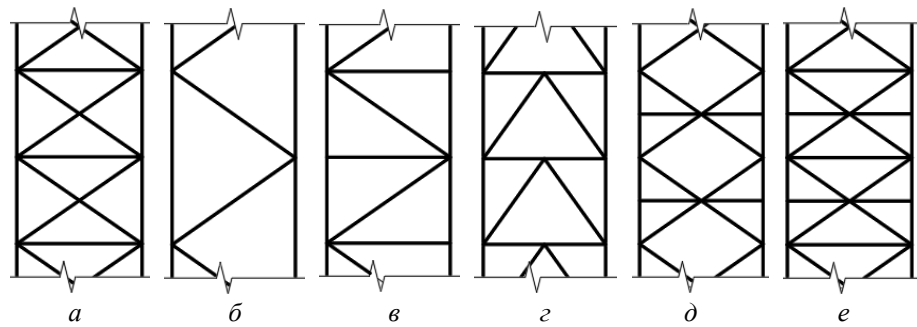


Рис. 1. Типы решеток башен: *a* — крестовая; *b* — треугольная; *в* — треугольная с распоркой; *г* — полураскосная; *д* — ромбическая; *е* — крестово-ромбическая

Вопросы оптимизации, а также влияния различных типов решеток на работу башен под действием максимальных нагрузок были рассмотрены в работе Е. И. Михальчонок, А. В. Голикова [9] и И. Р. Бадертдинова [10, 11]. Работы в направлении оптимизации формы решетчатых стальных башен продолжают проводиться.

Так как решетчатая башня является частным случаем пространственных ферм, необходимо упомянуть авторов, внесших вклад в развитие подобных конструкций, среди них: И. С. Холопов [12], Г. В. Воронкова [13], а также А. Г. Юрьев [14].

В связи с тем, что происходит активное развитие сотовой и теле-, радиокоммуникации и, как следствие, увеличиваются нагрузки на существующие решетчатые башни, требуется их усиление, что отражено в работах В. А. Тернового [15], В. В. Губанова*.

Также вопросами работы башенных конструкций занимались такие авторы, как М. Б. Солодарь [16], А. Ю. Чаускин [17], Г. А. Савицкий [18].

В заграничной практике исследования работы башенных сооружений в различных направлениях описывались такими учеными, как А. Khokakaki, P. von Buelow [19], M. Pavan Kumar, P. Markankeya Raju, G. Tirupathi Naiku [20], J. Szafran, K. Juszczuk, M. Kamiński [21, 22], R. Axisa, M. Muscat, T. Sant, R. N. Farrugia [23], N. Mahesh, V. Ranga Rao [24], M. Tah Abdulaqder, M. Alsilevanai Kamiran, M. Özakça [25], S. Sweet, A. Prakash [26].

Исходные данные для анализа распределения внутренних усилий в элементах башни

Для анализа распределения усилий, возникающих в решетке при работе башни под нагрузкой, принята высота $H = 70$ м с шириной основания $b = 5$ м. К башне были приложены следующие нагрузки: ветровая нагрузка для II ветрового района и типа местности А, собственный вес конструкций и вес технологического оборудования, приложенный на отметке +72,000 м массой 120 кг, и наветренной площадью, равной $3,5 \text{ м}^2$.

В инженерной практике на стадии предпроектных проработок часто стоит задача выполнить оценку предварительной стоимости строительства. Ключевым фактором в оценке стоимости является вес стальных конструкций по маркам сталей и профилям сечений конструкций. Наиболее простым спо-

* Губанов В. В. Обеспечение долговечности решетчатых башен : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Магсеевка, 1995. 24 с.

собом решения предварительной оценки является проведение упрощенного аналитического расчета башни с расчетной модели в виде консольного стержня. Для оценки достоверности полученных результатов аналитического расчета консольного стержня параллельно выполнены расчеты пространственных схем сооружений.

Расчетные модели башни в виде консольного стержня переменной жесткости и пространственной системы приведены на рис. 2.

Ветровая нагрузка в консольной модели прикладывается в виде распределенной (рис. 2, *a*), в модели пространственной фермы (рис. 2, *б*) — в виде узловой, собранной с грузовой наветренной площади.

Расчет ветровой нагрузки осуществляется путем разделения сооружения по высоте на расчетные участки. При выполнении расчетов в данной работе башня разбивалась на 20 участков по высоте.

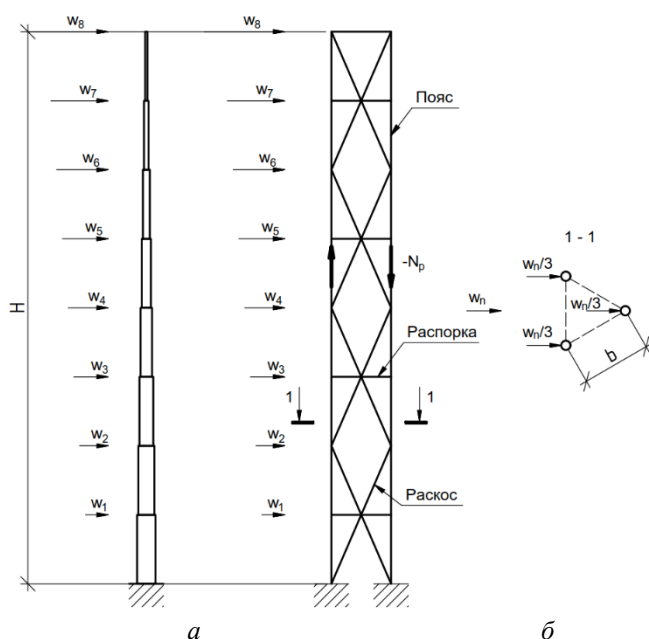


Рис. 2. Расчетная схема башни: *a* — консоль; *б* — пространственная ферма

Расчет башен выполнен с шестью типами решетки, показанных на рис. 1. Вычисление значения ветровой нагрузки производилось в соответствии с действующими нормами. Нагрузка на башню и на оборудование от действия ветра производилась отдельно. Стоит отметить, что величина ветровой нагрузки может изменяться в достаточно широком диапазоне: в зависимости от размера блока изменяется площадь, ограниченная контуром. В связи с тем, что изменяются размеры блока, изменяются и размеры элементов, а следовательно, и их расчетная длина. Это приводит к перераспределению усилий в элементах, вследствие чего изменяется площадь проекции наветренной части элемента. В конечном итоге это приводит к изменению средней составляющей ветровой нагрузки. Так как меняется вес блока и жесткость поясов из-за изменений геометрии, то изменяются и параметры частот собственных колебаний, от которых прямо зависит пульсационная составляющая ветровой

нагрузки. Следовательно, процесс сбора ветровой нагрузки является итерационным процессом. На предпроектной стадии для того, чтобы начать сбор нагрузки, требуется задаться геометрией, которая обеспечит наибольшую экономию материала и позволит сохранить некоторую площадь городского пространства. В настоящее время в литературе нет четких рекомендаций для рациональных размеров решетки, данная тема будет раскрыта далее в статье.

Совершенствование аналитических зависимостей для определения усилий в элементах решетки

Расчет усилий в элементах башни производился с помощью формул из табл. 1.

Таблица 1

Формулы для определения внутренних усилий

Тип решетки	Формула для определения продольных усилий i -го участка	
	Пояс	Раскос
Крестовая	$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{a\sqrt{3}} - \frac{N_i}{3} \right]$	$S_d = \mp \frac{Q_i}{3 \sin(\gamma)}$
Раскосная с распоркой	$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{a\sqrt{3,25}} - \frac{N_i}{3} \right]$	$S_d = \mp \frac{Q_i}{1,85 \sin(\gamma)}$
Раскосная	$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{a\sqrt{3,25}} - \frac{N_i}{3} \right]$	$S_d = \mp \frac{Q_i}{1,85 \sin(\gamma)}$
Полураскосная	$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{a\sqrt{3,85}} - \frac{N_i}{3} \right]$	$S_d = \mp \frac{Q_i}{1,85 \sin(\gamma)}$
Ромбическая	$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{a\sqrt{2,75}} - \frac{N_i}{3} \right]$	$S_d = \mp \frac{Q_i}{2,85 \sin(\gamma)}$
Крестово-ромбическая	$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{a\sqrt{2,75}} - \frac{N_i}{3} \right]$	$S_d = \mp \frac{Q_i}{2,85 \sin(\gamma)}$

Полученные в табл. 1 формулы были уточнены из исходных формул (1) и (2), описанных в статье [4]:

$$S_p = \left[-\frac{2 \cdot M_i}{b\sqrt{3}} - \frac{N_i}{3} \right] \frac{1}{\cos(\alpha_i)}, \tag{1}$$

$$S_d = \mp \frac{Q_i}{3 \sin(\gamma)}, \tag{2}$$

где S_p — продольное усилие в поясе; S_d — продольное усилие в раскосах; M_i , N_i , Q_i — изгибающий момент, продольная сила и поперечная сила i -го участка; b — ширина панели; γ — угол между раскосом и вертикалью в плоскости грани; α_i — угол наклона пояса башни к вертикали.

Полученные в табл. 1 формулы были уточнены с целью снижения расхождения между численным и аналитическим расчетом.

На рис. 3—8 приведено сравнение проверок по критерию прочности и гибкости для элементов блока, находящихся на соответствующей отметке, при использовании элементов с одинаковыми поперечными сечениями в численной постановке и аналитическом решении.

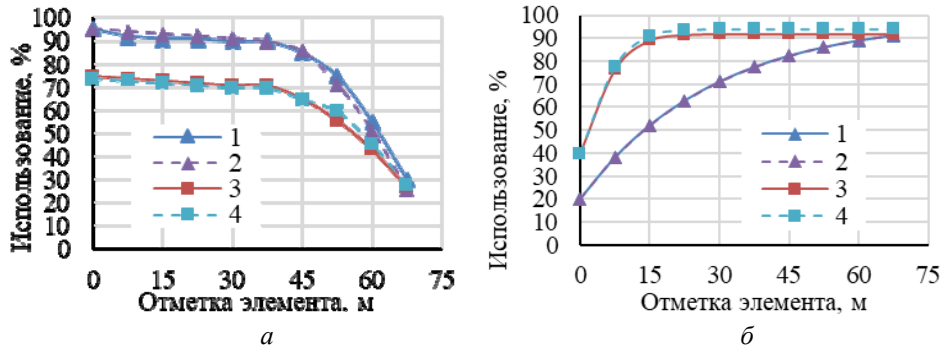


Рис. 3. Сравнение элементов башни с крестовой решеткой. Диаграмма по критерию: *a* — прочности; *b* — гибкости: 1 — пояс (аналитический метод); 2 — пояс (численный метод); 3 — раскос (аналитический метод); 4 — раскос (численный метод)

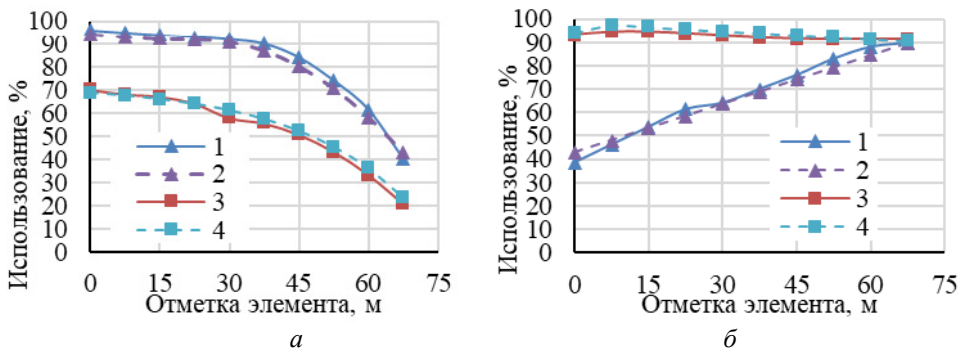


Рис. 4. Сравнение элементов башни с треугольной решеткой с распоркой. Диаграмма по критерию: *a* — прочности; *b* — гибкости: 1 — пояс (аналитический метод); 2 — пояс (численный метод); 3 — раскос (аналитический метод); 4 — раскос (численный метод)

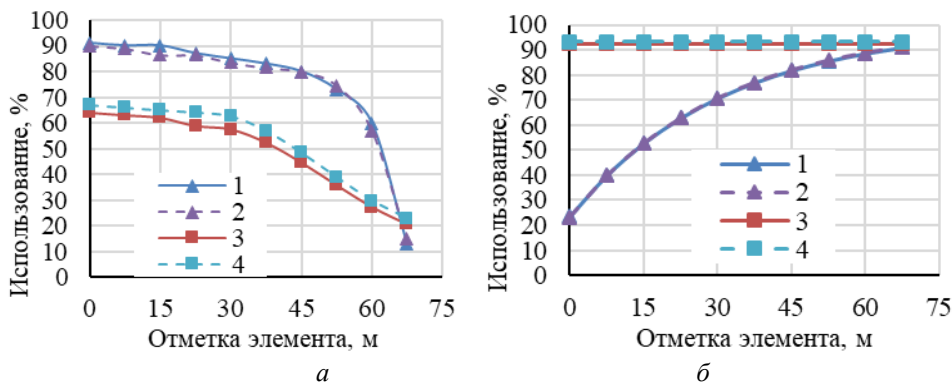


Рис. 5. Сравнение элементов башни с треугольной решеткой. Диаграмма по критерию: *a* — прочности; *b* — гибкости: 1 — пояс (аналитический метод); 2 — пояс (численный метод); 3 — раскос (аналитический метод); 4 — раскос (численный метод)

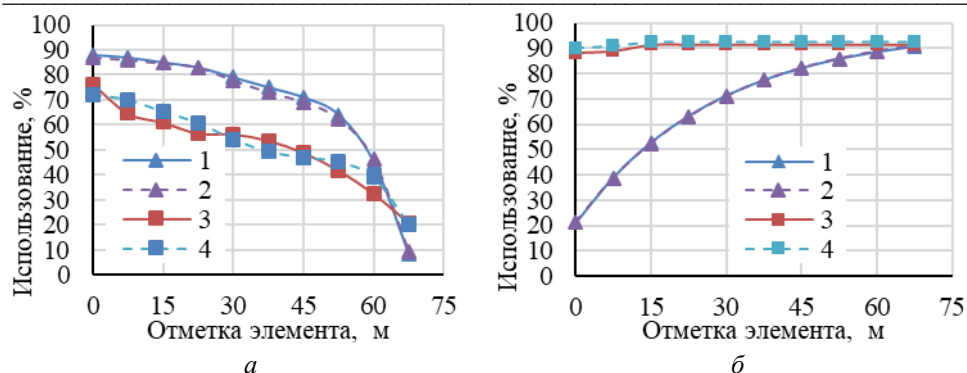


Рис. 6. Сравнение элементов башни с полураскосной решеткой. Диаграмма по критерию: *a* — прочности; *б* — гибкости: 1 — пояс (аналитический метод); 2 — пояс (численный метод); 3 — раскос (аналитический метод); 4 — раскос (численный метод)

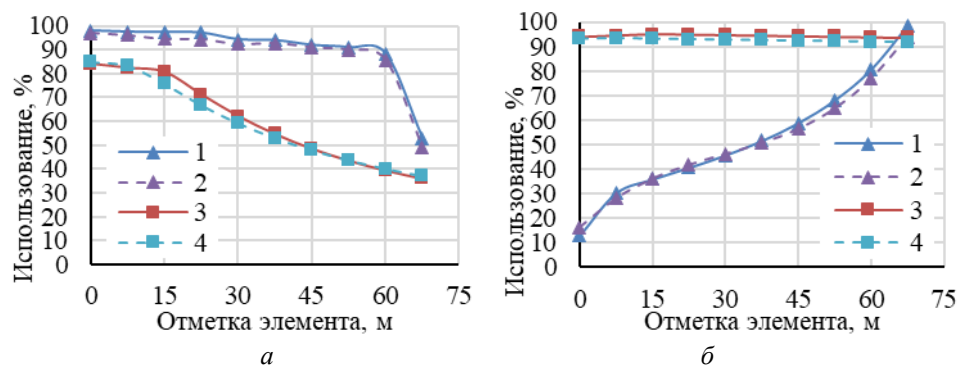


Рис. 7. Сравнение элементов башни с ромбической решеткой. Диаграмма по критерию: *a* — прочности; *б* — гибкости: 1 — пояс (аналитический метод); 2 — пояс (численный метод); 3 — раскос (аналитический метод); 4 — раскос (численный метод)

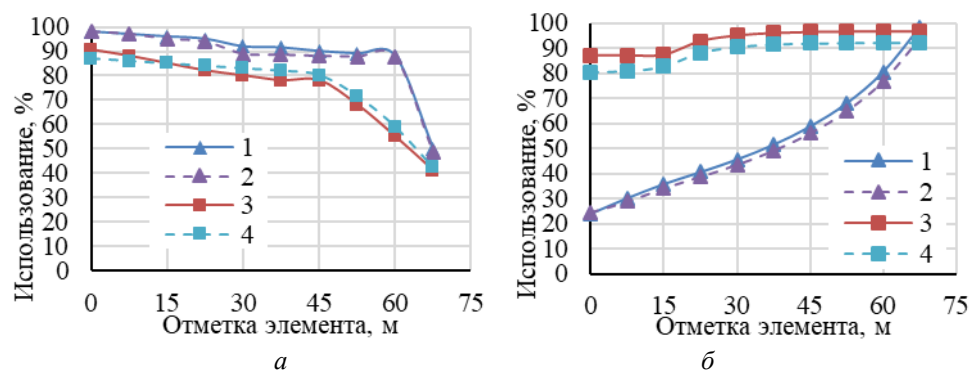


Рис. 8. Сравнение элементов башни с кресто-ромбической решеткой. Диаграмма по критерию: *a* — прочности; *б* — гибкости: 1 — пояс (аналитический метод); 2 — пояс (численный метод); 3 — раскос (аналитический метод); 4 — раскос (численный метод)

Исследование рациональных габаритных геометрических размеров трехгранных башен

Для анализа была выбрана башня высотой $H = 42$ м в соответствии с устоявшимся опытом проектирования подобных конструкций [7]. В башне варьируемыми характеристиками являются ширина и высота одного блока. Варьируемые параметры приняты в соответствии с табл. 2.

Все итоговые результаты будут получены в относительных величинах, что позволит использовать результаты для других призматических трехгранных башен различных высот.

К башне были приложены следующие нагрузки: ветровая нагрузка для II ветрового района и типа местности А, собственный вес конструкции и вес от технологического оборудования, приложенный на отметке +4,000 м массой 120 кг и наветренной площадью, равной $A = 3,5$ м².

Сбор нагрузок производится в соответствии с методикой, описанной выше.

Т а б л и ц а 2

Варьируемые величины в башне

Варьируемая величина	Буквенное обозначение	Значения варьируемой величины, м
Ширина башни	b	2,0; 3,0; 4,0; 5,0
Высота участка башни	h	2,0; 3,0; 3,5

Основным критерием для оптимизации формы башен является одновременное соблюдение требований первой и второй группы предельных состояний. В устоявшейся практике принято производить расчет только по критерию первого предельного состояния, при этом требование по соблюдению второго предельного обычно обеспечено с двукратным запасом, что по итогу приводит к перерасходу материала. Для обеспечения экономии материала, а следовательно, и снижения итоговой стоимости башни производились расчеты с одновременным соблюдением требований обеих групп предельных состояний.

Для анализа башен был принят набор из трех типов решеток, таких как: крестовая, треугольная с распоркой и ромбическая решетка. Данное решение было принято исходя из рекомендации В. В. Горева [3] и М. Б. Солодаря [8]. Так, треугольная с распоркой была принята исходя из того, что ее рекомендуется использовать при больших высотах башен, в сравнении с обычной треугольной, по причине возможности раскрепления пояса и уменьшения его расчетной длины в два раза. Крестовая была принята исходя из тех же плюсов, что и треугольная, но с возможностью учитывать только растянутые элементы в предположении, что сжатые элементы выключаются при работе. Ромбическая была принята по причине самого высокого уровня раскрепления элементов поясов, а следовательно, и меньшей наветренной площади. Крестово-ромбическая решетка не применена в расчетах по причине увеличения количества операций по изготовлению конструкций и, как следствие, увеличению стоимости строительства. Полуракосная не была применена по причине снижения общей жесткости сооружения и, как следствие, повышения деформативности при работе в ветровом потоке.

Для анализа влияния ширины башни на значение металлоемкости и максимальной деформации конструкции приняты трехгранные призматические башни для следующей линейки отношений ширины основания к высоте башни:

$$b = 2,0 \text{ м } (U = 0,048), b = 3,0 \text{ м } (U = 0,071),$$

$$b = 4,0 \text{ м } (U = 0,095), b = 5,0 \text{ м } (U = 0,119),$$

где $U = b / H$ — отношение ширины грани башни к высоте.

Высота типовой секции (блока) принималась постоянной, равной $h = 3,0$ м. Результаты подобранных сечений элементов отображены в табл. 3.

Таблица 3

Подобранные сечения элементов башни

Тип решетки, высота блока, м	Ширина блока, м	Распорки, мм	Пояса, мм	Раскосы, мм	М, т
Крестовая решетка, 3 м	2,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 121 \times 10}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	3,10
	3,0	$\frac{\varnothing 60 \times 3}{\varnothing 60 \times 3}$	$\frac{\varnothing 114 \times 8}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	3,23
	4,0	$\frac{\varnothing 83 \times 3}{\varnothing 83 \times 3}$	$\frac{\varnothing 140 \times 5,5}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 48 \times 3}{\varnothing 48 \times 3}$	4,08
	5,0	$\frac{\varnothing 102 \times 3}{\varnothing 102 \times 3}$	$\frac{\varnothing 140 \times 5}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 54 \times 3}{\varnothing 54 \times 3}$	5,16
Крестовая решетка, 2 м	3,0	$\frac{\varnothing 60 \times 3}{\varnothing 60 \times 3}$	$\frac{\varnothing 114 \times 7}{\varnothing 54 \times 3}$	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	3,61
Крестовая решетка, 3,5 м	3,0	$\frac{\varnothing 60 \times 3}{\varnothing 60 \times 3}$	$\frac{\varnothing 140 \times 6}{\varnothing 89 \times 3}$	$\frac{\varnothing 48 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	3,32
Решетка треугольная с распоркой, 3 м	2,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 140 \times 8}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 70 \times 3}{\varnothing 70 \times 3}$	2,89
	3,0	$\frac{\varnothing 60 \times 3}{\varnothing 60 \times 3}$	$\frac{\varnothing 114 \times 8}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 76 \times 3,5}{\varnothing 70 \times 3}$	3,18
	4,0	$\frac{\varnothing 83 \times 3}{\varnothing 83 \times 3}$	$\frac{\varnothing 133 \times 5,5}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 89 \times 3,5}{\varnothing 89 \times 3}$	4,00
	5,0	$\frac{\varnothing 102 \times 3}{\varnothing 102 \times 3}$	$\frac{\varnothing 108 \times 8}{\varnothing 76 \times 3}$	$\frac{\varnothing 102 \times 4}{\varnothing 102 \times 3}$	5,19
Решетка треугольная с распоркой, 2 м	3,0	$\frac{\varnothing 60 \times 3}{\varnothing 60 \times 3}$	$\frac{\varnothing 114 \times 7}{\varnothing 54 \times 3}$	$\frac{\varnothing 70 \times 3}{\varnothing 60 \times 3}$	3,28
Решетка треугольная с распоркой, 3,5 м	3,0	$\frac{\varnothing 70 \times 3}{\varnothing 70 \times 3}$	$\frac{\varnothing 121 \times 8}{\varnothing 89 \times 3}$	$\frac{\varnothing 83 \times 3,5}{\varnothing 76 \times 3}$	3,45
Ромбическая решетка, 3 м	2,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 121 \times 8}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	2,78
	3,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 108 \times 7}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	2,74
	4,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 114 \times 5,5}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 48 \times 3}{\varnothing 48 \times 3}$	3,16
	5,0	$\frac{\varnothing 54 \times 3}{\varnothing 54 \times 3}$	$\frac{\varnothing 102 \times 6}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 54 \times 4}{\varnothing 54 \times 3}$	3,90
Ромбическая решетка, 2 м	3,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 108 \times 7}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	3,24
Ромбическая решетка, 3,5 м	3,0	$\frac{\varnothing 42 \times 3}{\varnothing 42 \times 3}$	$\frac{\varnothing 108 \times 7}{\varnothing 48 \times 3}$	$\frac{\varnothing 48 \times 3,5}{\varnothing 42 \times 3}$	2,74

Примечание. М — металлоемкость, т; элементы решетки, прописанные в числителе, являются элементами верхнего блока, в знаменателе — нижнего блока.

Величина значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки зависит от частоты собственных колебаний конструкции. Общеизвестно, что при изменении ширины башни меняется общая жесткость башни, а также ее собственный вес, а следовательно, и пульсационная составляющая ветровой нагрузки.

Графики зависимости первой частоты собственных колебаний f_1 от отношения ширины грани башни к высоте U приведены на рис. 9.

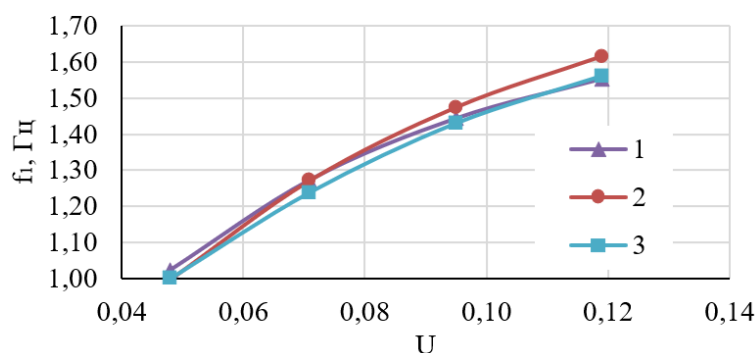


Рис. 9. График зависимости частоты собственных колебаний f_1 от отношения ширины грани башни к высоте U . За $f_1 = 1$ принято наименьшее значение частоты собственных колебаний, что соответствует башне с ромбической решеткой $U = 0,048$ (ширина грани 2 м). Тип решетки: 1 — крестовая; 2 — треугольная с распоркой; 3 — ромбическая

Для ускорения проведения аналитических расчетов в инженерной практике на стадии предпроектных работ выполнена аппроксимация частот собственных колебаний от U для принятых типов решетки. Для крестовой решетки функция изменения частоты собственных колебаний представлена в формуле (3), для ромбической решетки — в формуле (4), а для треугольной с распоркой — в формуле (5):

$$f_1 = 1,75(1 - e^{-18,28U}), \quad (3)$$

$$f_1 = 1,95(1 - e^{-14,91U}), \quad (4)$$

$$f_1 = 1,85(1 - e^{-15,61U}), \quad (5)$$

где f_1 — первая частота собственных колебаний, Гц.

Аналитический расчет башни производят посредством деления ее на расчетные участки по высоте, которые совпадают с монтажными блоками. Внутренние усилия, возникающие в блоке, сильно различаются по высоте башни по причине того, что башня является вертикальной консолью, на которую действует горизонтальная, возрастающая по высоте нагрузка. Наиболее нагруженным является нижний блок, так как в нем возникают самые большие моменты, продольные и поперечные силы, следовательно, пояса в нижней части имеют самые развитые сечения, размеры которых рассчитываются по критерию устойчивости. По мере приближения к верхней отметке

нагрузка снижается, уменьшаются усилия в поясах и происходит постепенное изменение расчетных моделей — сечения подбираются не по критерию обеспечения устойчивости, а по критерию обеспечения жесткости.

Как правило, сечения элементов верхнего блока подбираются по требованиям гибкости. Этим и обуславливается изменение металлоемкости по высоте. Данный переход был представлен на рис. 10 для крестовой решетки, треугольной решетки с распоркой и ромбической решетки, где N — номер участка, а 1, 2, 3, ..., n — маркировка номеров блоков.

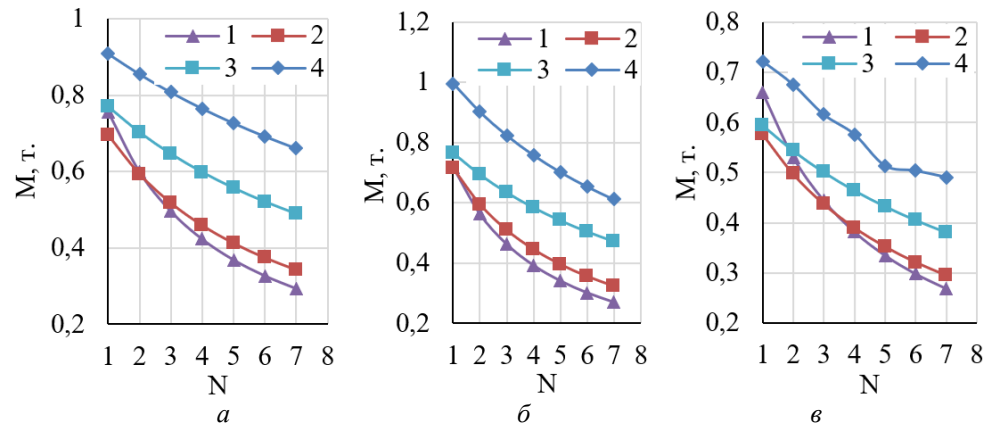


Рис. 10. График изменения металлоемкости по участкам в башне с решеткой: a — крестовой; $б$ — треугольной; $в$ — ромбической: 1 — $U=0,048$; 2 — $U=0,071$; 3 — $U=0,095$; 4 — $U=0,119$

Выведем функцию металлоемкости для призматических трехгранных башен от отношения ширины грани к высоте башни U , аппроксимированная функция которой имеет вид, представленный на рис. 11, и формулу (6) для крестовой решетки, формулу (7) для треугольной решетки с распоркой и формулу (8) для ромбической решетки:

$$M_U = 2,60(1 - e^{-9,84U}), \quad (6)$$

$$M_U = 3,18(1 - e^{-7,10U}), \quad (7)$$

$$M_U = 1,46(1 - e^{-19,94U}). \quad (8)$$

Отметим, что самые низкие показатели металлоемкости были получены при $U = 0,048$ (высота 3 м для ширины 2 м) и $U = 0,071$ (ширины 3 м). Следовательно, эти отношения ширины грани к высоте башни являются самыми экономичными по показателю металлоемкости, однако, несмотря на то, что при ширине 2 м ($U = 0,048$) башня имеет самые высокие экономические показатели, она не проходит по требованию II предельного состояния, так как деформации больше предельно допустимых (рис. 12). Следовательно, башню при такой ширине нельзя назвать рациональной.

Одним из показателей рациональности принятых отношений ширины грани к высоте башни является тот факт, что на пояса при $U = 0,048$ и

$U = 0,071$ приходится наибольшая металлоемкость, чем на раскосы и распорки. Данные показатели проиллюстрированы на рис. 13 для крестовой решет- ки, треугольной решетки с распоркой и ромбической решетки.

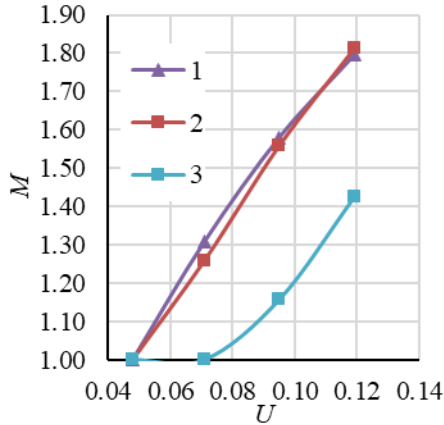


Рис. 11. Относительная металлоемкость M от отношения ширины грани башни к высоте конструкции U . За $M=1$ принято наименьшее значение суммарной массы башни, что соответствует башне с ромбической решеткой $U=0,048$ (ширина грани 2 м). Тип решетки: 1 — крестовая; 2 — треугольная с распоркой; 3 — ромбическая

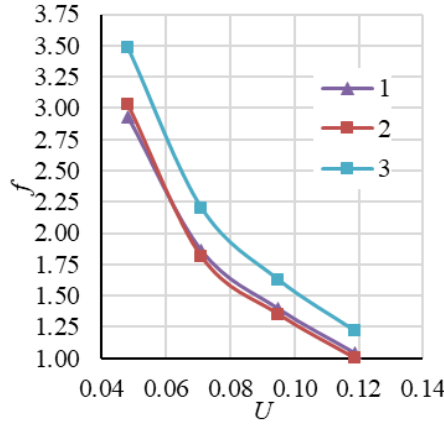


Рис. 12. Относительная деформация f от отношения ширины грани башни к высоте конструкции U . За $f=1$ принято наименьшее значение деформации, что соответствует призматической башне с треугольной решеткой $U=0,119$ (ширина грани 5 м). Тип решетки: 1 — крестовая; 2 — треугольная с распоркой; 3 — ромбическая

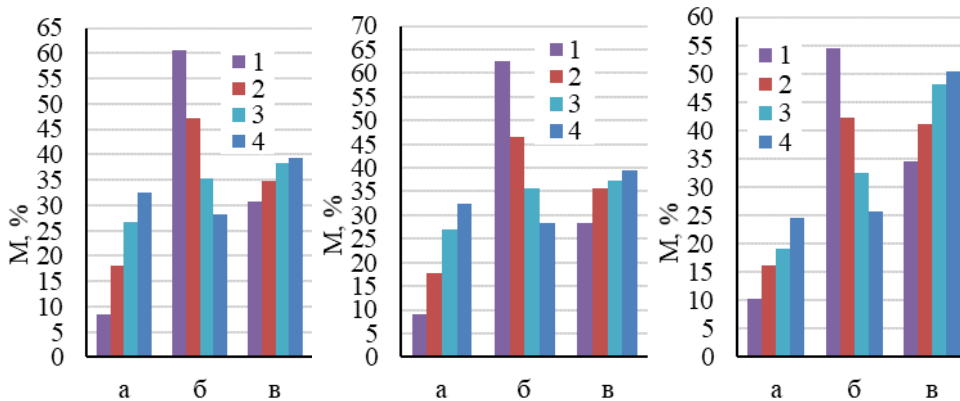


Рис. 13. Диаграмма распределения стали по элементам решетчатой башни, где: a — распорки; b — пояса; v — раскосы. При отношении ширины грани башни к высоте конструкции U , где: 1 — $U=0,048$; 2 — $U=0,071$; 3 — $U=0,095$; 4 — $U=0,119$. Тип решетки: 1 — крестовая; 2 — треугольная с распоркой; 3 — ромбическая

Результаты анализа влияния высоты элементарного блока башни на общую металлоемкость конструкции

Для расчета принимается башня высотой $H = 42$ м с шириной грани $b = 3$ м, отношение ширины грани башни к высоте конструкции $U = 0,071$ по

причине ее рациональности, описанной выше. Для соблюдения требования по наклону раскоса $30\dots60^\circ$ примем высоты секций 2,0 м ($J = 0,667$), 3,0 м ($J = 1,000$), 3,5 м ($J = 1,167$), где $J = h / b$ — отношение ширины грани башни к высоте панели (блока). Подобранные сечения башен приведены в табл. 3.

С изменением высоты блока изменяются и частотные характеристики конструкции, что описано ранее. Выполним аппроксимацию частот собственных колебаний от J (рис. 14) для принятых типов решетчатой конструкции. Для крестовой решетки функция изменения частоты собственных колебаний представлена в формуле (9), для ромбической решетки — в формуле (10), а для треугольной с распоркой — в формуле (11):

$$f_1 = \frac{1}{-2,78 + 8,48 \cdot J - 4,74 \cdot J^2}, \quad (9)$$

$$f_1 = 7,71 - 15,28 \cdot J + 8,57 \cdot J^2, \quad (10)$$

$$f_1 = 6,86 - 13,29 \cdot J + 7,43 \cdot J^2. \quad (11)$$

Выведем функцию металлоемкости для призматических трехгранных башен от отношения ширины грани башни к высоте блока J . Аппроксимированная функция имеет вид, представленный на рис. 15, и может быть выражена зависимостью (12) для крестовой решетки, формулой (13) для треугольной решетки с распоркой и формулой (14) для ромбической решетки:

$$M_J = 0,44 + 0,5 \cdot J + \frac{0,24}{J^2}, \quad (12)$$

$$M_J = 0,21 \cdot 5,50^J \cdot J^{(-1,48)}, \quad (13)$$

$$M_J = 0,50 + 0,28 \cdot J + \frac{0,22}{J^2}. \quad (14)$$

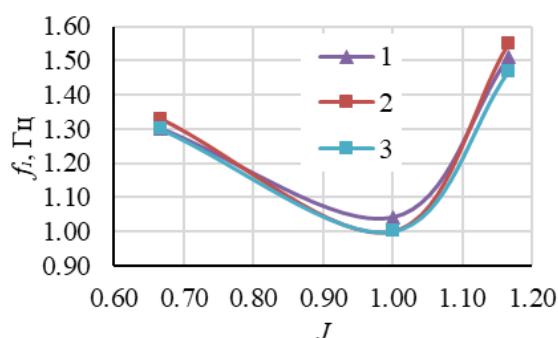


Рис. 14. График зависимости частоты собственных колебаний f_1 от отношения ширины грани башни к высоте блока J при типе решетки: 1 — крестовая; 2 — треугольная с распоркой; 3 — ромбическая. За $f_1 = 1$ принято наименьшее значение частоты собственных колебаний, что соответствует башне с ромбической решеткой $J = 1,000$ (высота блока 3 м)

По итогу анализа данных, самые низкие показатели металлоемкости были у башен при высоте блока 3 м ($J = 1,000$) и 3,5 м ($J = 1,167$) и ширине блока, равного 3 м. Однако именно при высоте блока, равной 3 м ($J = 1,000$), башня используется максимально по критерию II предельного состояния, а следовательно, наиболее рациональна. График деформаций показан на рис. 16.

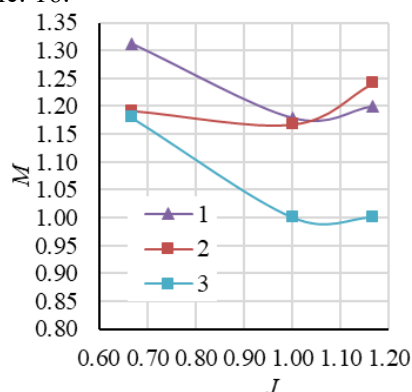


Рис. 15. Относительная металлоемкость M от отношения ширины грани башни к высоте блока J при типе решетки: 1 — крестовой; 2 — треугольной с распоркой; 3 — ромбической. За $M = 1$ принято наименьшее значение суммарной массы башни, что соответствует башне с ромбической решеткой $J = 1,000$ (высота блока 3 м)

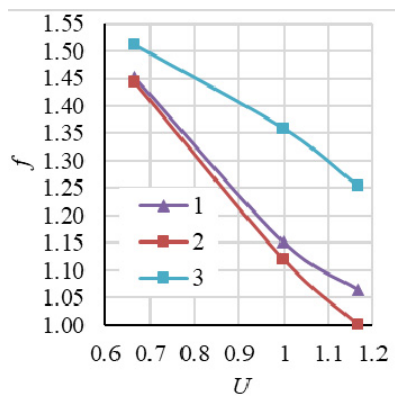


Рис. 16. Относительная деформация f от отношения ширины грани к высоте блока башни J при типе решетки: 1 — крестовой; 2 — треугольной с распоркой; 3 — ромбической. За $f = 1$ принята наименьшая деформация, что соответствует призматической башне с треугольной решеткой $J = 1,167$ (высота блока 3,5 м)

Принципы компоновки габаритных размеров трехгранных решетчатых башен

По результатам проведенной работы сформулированы общие принципы компоновки габаритных размеров решетчатых башен:

- высота башни H определяется максимальной высотой размещения технологического оборудования;
- ширина верхнего основания определяется размерами площадки для размещения технологического оборудования или габаритными размерами лестницы, необходимыми для ее размещения внутри пространства башни;
- размер нижнего основания определяется требованиями 1 и 2 ГПС и принимается в диапазоне от $1/n$ до $1/j$ от общей высоты башни в зависимости от ветрового района площадки строительства; корректируется данными номограмм настоящей статьи и статьи [9];
 - тип решетки и размер панели (шаг распорок) определяются графиками на приведенных в данной статье и статье [8] номограммах;
 - предварительная металлоемкость оценивается для назначенных размеров башни по данным номограмм настоящей статьи и статей [8, 9].

Блок-схема определения размеров башни на стадии предпроектных работ и в процессе проектирования представлена на рис. 17. Пошаговый алгоритм выбора рациональных размеров башни представлен на примере.

По итогу проведенных работ была выведена зависимость (15) для получения предварительного веса башен, т, расположенных во втором ветровом районе, для башен в диапазоне 30...55 м. Достоверность результатов составляет 7...10 %:

$$M_m = 0,013 \cdot M_U \cdot M_J \cdot H \left(\frac{b^2 \sqrt{3}}{4} \right). \quad (15)$$

Пример. Требуется разработать проект башни, предназначенной для эксплуатации на территории Ленинградской области. Технологическое оборудование в виде антенно-фидерных устройств с наветренной площадью, равной 4 м², и массой 150 кг. Максимальная отметка размещения антенн 54 м. Определить эффективные габаритные размеры башни и предварительную металлоемкость.

Порядок определения габаритных размеров башни:

- по данным предельной отметки размещения технологического оборудования принята общая высота башни H , равная 54 м;
- произведем подбор типа решетки стальной башни исходя из критерия наименьшей металлоемкости;
- предварительно примем ширину b башни равной 4 м, а также высоту блока h при соблюдении требований к наклону раскоса в диапазоне 30...60° равной 3 м;
- вычислим значения $U = b / H$, равное 4 м ($U = 0,074$);
- воспользуемся полученными зависимостями в виде формул (6) либо графиком на рис. 12 для оценки металлоемкости различных типов решетки башни в зависимости от отношения ширины грани башни к высоте башни, получим результаты для крестовой решетки ($M_{U,1} = 1,35$), треугольной решетки с распоркой ($M_{U,2} = 1,3$) и ромбической решетки ($M_{U,3} = 1,13$);
- вычислим значения $J = h / b$, равные $h_1 = 3$ м ($J = 0,75$);
- воспользуемся полученными зависимостями в виде формулы (12) либо графиком на рис. 16 для оценки металлоемкости различных типов решетки башни в зависимости от отношения ширины грани к высоте блока, получим результаты для крестовой решетки ($M_{J,1} = 1,24$), треугольной решетки с распоркой ($M_{J,2} = 1,16$) и ромбической решетки ($M_{J,3} = 1,10$);
- примем для расчета призматическую трехгранную башню с ромбической решеткой исходя из критерия наименьшей металлоемкости и размерами единичного блока высотой 3,25 м и шириной 4 м;
- предварительный вес башни вычислим по формуле (15), получим значение $M_t = 8,14$ т;
- назначим предварительные сечения элементов башни, двигаясь при выполнении расчетов в направлении сверху вниз: сечения элементов верхнего блока назначим по критерию обеспечения требуемой гибкости, каждым последующим ярусам сечение будем увеличивать на один профиль;
- выполним расчет ветровой нагрузки;
- для проверки и корректировки принятых сечений по критериям I ГПС и II ГПС создадим расчетную схему башни в программном продукте, работа которого основана на МКЭ.

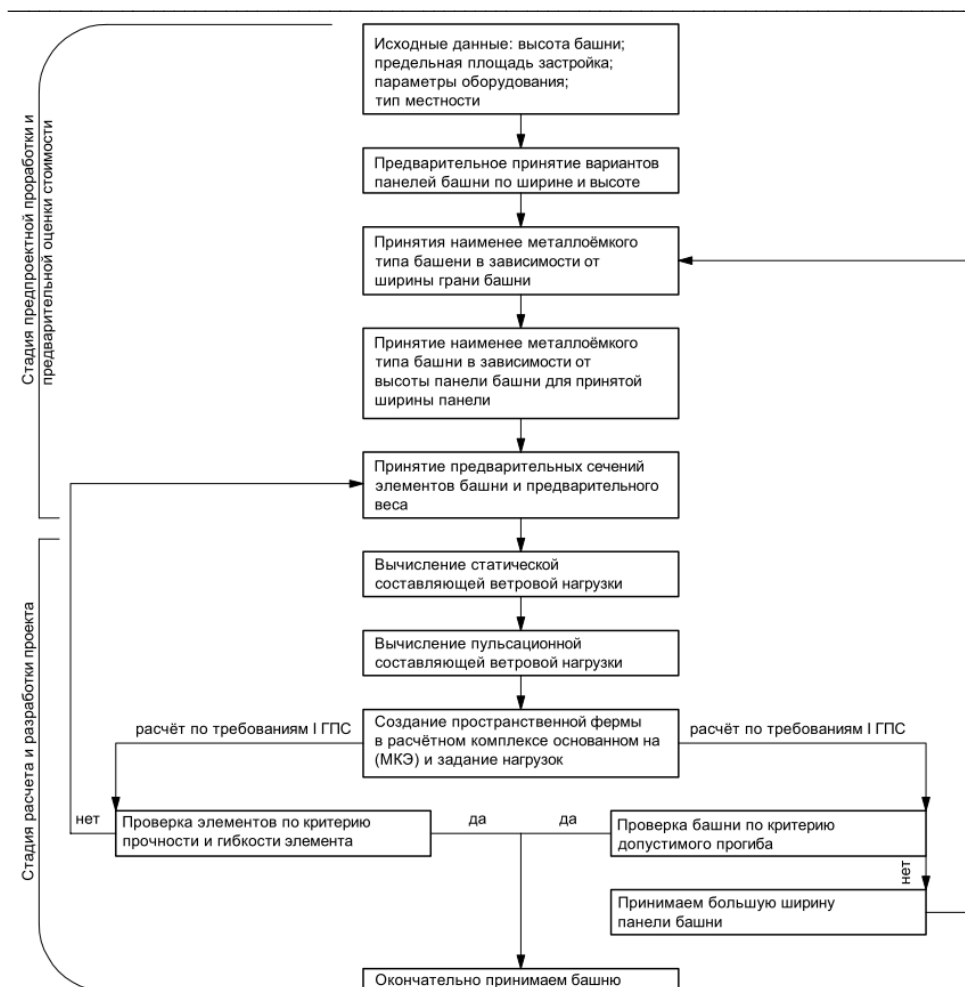


Рис. 17. Методика расчета габаритных размеров башни

Выводы

1. Выполнен критический анализ существующей литературы по вопросам расчета и проектирования решетчатых башен, классифицированы конструкции башен. По итогу изучения литературы не установлены методики назначения габаритных размеров трехгранных башен с рациональными размерами, чем обоснована актуальность настоящей работы.

2. По результатам анализа применимости типов решетки башен отобраны наиболее применимые типы для проведения исследований. Исследовано распределение усилий в решетках башен, скорректированы существующие формулы аналитического расчета усилий в решетках. Данными численных расчетов на пространственных моделях обоснована достоверность полученных аналитических зависимостей. Сходимость результатов численных и аналитических решений находится в диапазоне 1...5 %.

3. Ключевым критерием рационализации размеров принят критерий одновременного соблюдения требования двух групп предельных состояний с минимальными запасами по расчетным проверкам обоих ГПС. Принятый

подход позволяет получить сооружения минимальной массы и, следовательно, минимальной стоимости.

4. В результате анализа НДС башен с различными отношениями ширины панели к высоте башни для критерия одновременного соблюдения требований I ГПС и II ГПС наиболее рациональным и экономически эффективным решением стала башня с $U = 0,071$.

5. В результате анализа башен с различными отношениями ширины грани к высоте панели башни при одновременном соблюдении требований I ГПС и II ГПС наиболее рациональным и экономически эффективным решением стала башня с $J = 1,167$.

6. Отметим, что наименее металлоемким типом решетки в трехгранных призматических башнях стала ромбическая решетка, что утверждалось рядом авторов [1, 16]. Башни с крестовой решеткой сопоставимы по эффективности с башнями с треугольной решеткой с распоркой по критерию металлоемкости, несмотря на достаточно сильные конструктивные различия.

7. Обобщены в виде инженерной методики принципы компоновки габаритных размеров трехгранных решетчатых башен, что позволяет применить результаты исследований в инженерной практике на стадии предпроектной проработки и предварительной оценки стоимости строительно-монтажных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловский В. Ф., Кондра М. П. Стальные башни (проектирование и монтаж) / Под ред. Л. И. Шитова. Киев : Будівельник, 1979. 198 с.
2. Краснощеков Ю. В. Эффективность антенных опор, возводимых на ограниченной площади // Вестн. СибАДИ. 2012. № 5(27). С. 60—65.
3. Металлические конструкции : в 3 т. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения : учеб. для строит. вузов / Под ред. В. В. Горева. 2-е изд., испр. М. : Высш. шк., 2002. 544 с.
4. Юрьев А. Г., Клюев С. В., Клюев А. В. Особенности проектирования высотных стержневых конструкций из стали // Вестн. Белгор. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. 2008. № 4. С. 42—45.
5. Металлические конструкции : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Под ред. Ю. И. Кудишина. 10-е изд. М. : Академия, 2007. С. 600—624.
6. Металлические конструкции / Н. С. Стрелецкий, А. Н. Гениев, Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Е. Н. Лессиг ; под ред. Н. С. Стрелецкого. М. : Стройиздат, 1961. С. 709—739.
7. Мелихов Р. В., Леонова А. Н. Вытяжные башни — особенности проектирования, технико-экономическая оценка и вопросы типизации // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 3. С. 194—206. DOI: 10.33619/2414-2948/40/25.
8. Голиков А. В., Михальчонок Е. А., Мельникова Ю. А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженер. вестн. Дона. 2019. № 4(55). С. 53.
9. Голиков А. В., Михальчонок Е. А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. : Инженер. исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 163—173. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173.
10. Бадертдинов И. Р., Кузнецов И. Л. Оптимальные геометрические параметры поперечного сечения трехгранных стальных опор // Изв. Казан. гос. архитектур.-строит. ун-та. 2016. № 2(36). С. 95—99.
11. Ахтямова Л. Ш., Иващенко И. О., Сабитов Л. С., Чепурненко А. С. Оптимизация прожекторной мачты в виде трехгранной решетчатой башни // Инженер. вестн. Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n11y2022/8011.
12. Холопов И. С., Бальзаников М. И., Алпатов В. Ю. Применение решетчатых пространственных металлических конструкций в покрытиях машинных залов ГЭС // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2012. № 28(47). С. 225—232.

13. *Воронкова Г. В., Гурова Е. В., Карасев Г. М.* Особенности реконструкции ферм покрытия с изменением расчетной схемы в условиях действующего предприятия // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2017. № 48(67). С. 27—37.
14. *Юрьев А. Г., Клюев С. В., Клюев А. В.* Оптимальное проектирование стержневой пространственной конструкции из стали // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 1. С. 18—23.
15. *Голиков А. В., Терновой В. А., Габова В. В.* Метод усиления решетчатых башен // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2022. № 1(86). С. 18—32.
16. *Солодарь М. Б., Кузнецова М. В., Плишкин Ю. С.* Металлические конструкции вытяжных башен / Под ред. Ю. А. Павлова. Л. : Стройиздат : Ленингр. отд-ние, 1975. 186 с.
17. *Чаускин А. Ю., Старов А. В., Карасев Г. М.* Расчет и конструирование башенных сооружений комбинированного типа // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2013. № 32(51). С. 49—54.
18. *Савицкий Г. А.* Основы расчета радиомачт. Статика и динамика. М. : Гос. изд-во лит. по вопросам связи и радио, 1953. 275 с.
19. *Khokakaki A., Von Buelow P.* Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower // Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints : IASS 2014 Brasilia Symposium, Sept. 15—19, Brasilia, Brazil. 2014. Pp. 1—8.
20. *Pavan K. M., Markankeya R. P., Tirupathi N. G.* Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication // Asian Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 18. No. 6. Pp. 911—927.
21. *Szafran J., Juszczak K., Kamiński M.* Experiment based reliability analysis of structural joints in a steel lattice tower // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 154. Pp. 278—292. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2018.11.006.
22. *Szafran J., Kamiński M., Juszczak K.* Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state : Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters / Ed. by L. Małyszko, R. Tarczewski. University of Warmia and Mazury in Olsztyn, 2016. Pp. 95—102.
23. *Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R. N.* Structural assessment of a lattice tower for a small, multibladed wind turbine // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 8. No. 4. Pp. 343—358.
24. *Mahesh N., Ranga Rao V.* Design and estimation of electric steel tower // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 646—652.
25. *Abdulaqder M. Tah, Kamiran M. Alsilevanai, Özakça M.* Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers // American Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 5. No. 2. Pp. 60—68.
26. *Sweety S., Prakash A.* Comparative Study of Three Pole Structure with Steel and FRP using Finite Element Analysis // International Journal of Science and Research. 2016. Vol. 5. No. 7. Pp. 1266—1269.

© Голиков А. В., Веремеев Д. В., 2023

Поступила в редакцию
в декабре 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Голиков А. В., Веремеев Д. В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 14—32.

Об авторах:

Голиков Александр Владимирович — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alexandr_golikov@mail.ru

Веремеев Дмитрий Валерьевич — магистрант, Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ). Российская Федерация, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; dmitry.veremeev@yandex.ru

Aleksandr V. Golikov^a, Dmitrii V. Veremeev^b

^a *Volgograd State Technical University*

^b *Saint Petersburg Mining University*

GENERALIZED PRINCIPLES OF LAYOUT AND DIMENSIONING OF TRIHEDRAL LATTICE TOWERS

In today's world, it is the quickly erected and cheap grid towers with a guaranteed service life that must provide high quality communications. To maintain a stable signal level between consumers, a large saturation of the territory with such structures is required. The article systematizes the principles of the layout of the overall dimensions of the towers on the basis of the results of the analysis of the data on the operation under load of the towers with sections of pipes when using different types of grids used in the construction practice. In order to clarify the existing analytical dependences of the assignment of the overall dimensions of the towers, analytical and numerical calculations have been made. Varying of the overall dimensions has been performed in order to find the most rational forms. The results of the research are presented in relative parameters, which allows the engineer to be guided by them at the stage of developing the layout diagrams of the towers. The data can be useful in determining the preliminary cost of construction.

Key words: cellular tower, steel lattice tower, rational geometric dimensions, triangular towers, stress-strain state, loads, forces, deformations, layout principles.

For citation:

Golikov A. V., Veremeev D. V. [Generalized principles of layout and dimensioning of trihedral lattice towers]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2023, iss. 1, pp. 14—32.

About authors:

Aleksandr V. Golikov — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alexandr_golikov@mail.ru

Dmitrii V. Veremeev — Master's Degree student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation; dmitry.veremeev@yandex.ru