



УДК 624.074.5:624.014.2

**Е. Н. ОБЛЕТОВ**, аспирант, ст. преп. кафедры теории сооружений и технической механики<sup>1</sup>, инженер-проектировщик<sup>2</sup>, **Н. Ю. ТРЯНИНА**, канд. техн. наук, проф. кафедры теории сооружений и технической механики<sup>1</sup>; **Е. С. ЗУБАНОВ**, аспирант кафедры металлических конструкций<sup>1</sup>; **М. Г. ЗАЙЦЕВА**, студент<sup>1</sup>

## АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СТАЛЬНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ БАШЕН (ОБЗОР)

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет». Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: evg.obletov@gmail.com

<sup>2</sup>ООО «Союзстальконструкция».

Россия, 603155, г. Н. Новгород, ул. М. Горького, д. 262, оф. П250.

Тел.: (831) 422-12-23; эл. почта: soyzstal@mail.ru

*Ключевые слова:* стальные решетчатые башни, совершенствование, конструктивная форма, поперечные сечения поясов.

---

*В обзоре рассматривается история возникновения и развития ключевых идей, определивших конструктивные решения высотных сооружений объектов связи. Представлен подробный анализ по вопросам формирования конструкции, типам решеток и поперечных сечений поясов башен. Основное внимание уделяется анализу методов совершенствования башен, включая улучшение надежности, устойчивости и снижение материалоемкости.*

---

Стальные решетчатые башни являются важным элементом современной инфраструктуры, востребованным в телекоммуникациях, энергетике и других отраслях. Эти конструкции прошли значительный путь развития, постоянно совершенствуясь. Выбор конструктивной формы антенных сооружений определяется следующими параметрами: соответствие технологическим и эксплуатационным требованиям, функциональность архитектурного решения, технологичность изготовления и монтажа, экономическая эффективность [1].

На сегодняшний день наибольшее число опор – решетчатые башни, берущие свое начало от башни Эйфеля в Париже. В начале XX века инженерная мысль совершила прорыв в проектировании башенных конструкций, ярким примером чего стали работы российского инженера Владимира Григорьевича Шухова. Его концепция башен в виде сетчатых гиперболоидов вращения нашла применение в России и за ее пределами [2].

Массовое строительство башен началось в 1930-е годы. На тот момент для изготовления конструкций применялись уголки. Однако впоследствии, было доказано, что наиболее оптимальными являются трубы [3-5].

В СССР активно проводились обширные исследования башенных конструкций [6-7]. Прогресс в конструировании сооружений обеспечивался изучением ветровых воздействий в экспериментальных и натуральных условиях, анализом колебаний опор, оптимизацией аэродинамических показателей, уточнением расчетов ветровой нагрузки [8].

Исследование А. В. Перельмутера [9] охватывает эволюцию подходов к проектированию высоких башен и мачт с точки зрения аэродинамических и конструктивных характеристик.

Одним из важных направлений развития стало внедрение обтекаемых форм радиобашен, что существенно улучшило их аэродинамику [10-11]. Для борьбы с вибрациями были предложены два основных направления защиты: аэродинамические способы и применение гасителей [12-14].

#### Формообразование конструкции и типы решеток

Важным шагом на пути развития конструкций башен стало появление различных инновационных решений, представленных в патентах, которые отражают актуальные тенденции и достижения в проектировании башен.

В патенте [15] предложена конструкция башни, которая образована четырехгранной стойкой, выполненной из двух плоских ферм, расположенных в диагональных плоскостях. Фермы связаны распорками, что обеспечивает устойчивость конструкции (рис. 1а).

Автором патента [16] предложена конструкция башни, отличающаяся наличием крестообразного сечения с полуэллиптическим вырезом в наклонной плоскости (рис. 1б).

В патенте [17] представлена пирамидальная решетчатая башня, где пары смежных панелей имеют одинаковую длину поясных элементов и геометрическое подобие. В результате достигается двукратное повышение унификации длин поясов по сравнению с аналогичными башнями (рис. 1в).

Патент на сетчатую башню [18], предлагает конструкцию, которая состоит из стержней, пересекающихся по всей высоте в вершинах многоугольных колец жесткости (рис. 1г).

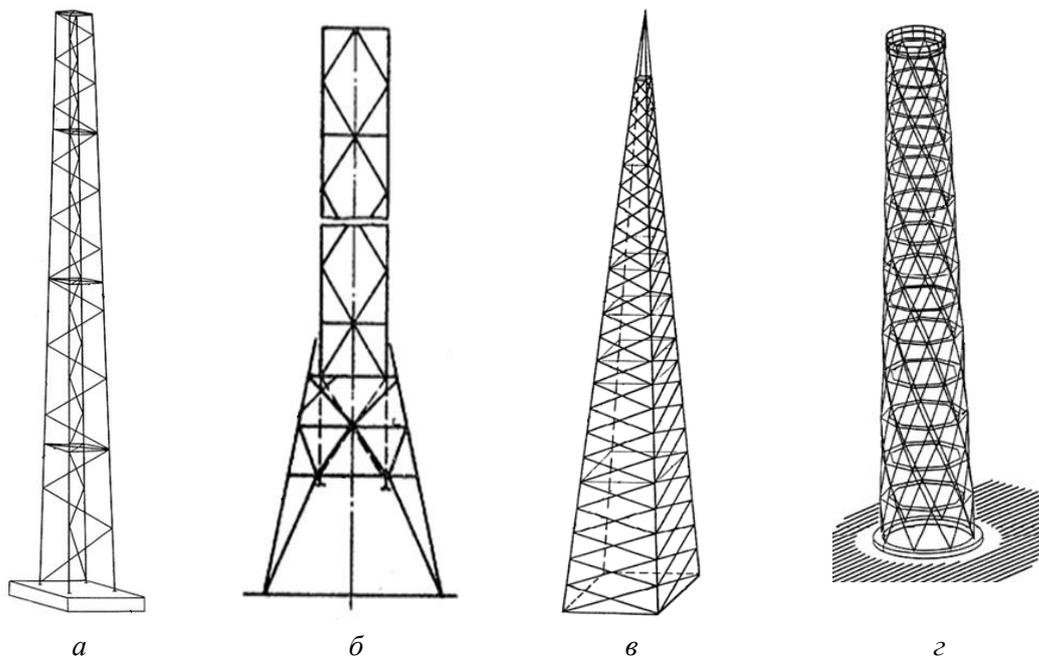


Рис. 1. Варианты башенных сооружений: а – Башня. Авт. свид. *SU787604A1* [15]; б – Решетчатая башня. Авт. свид. *SU1096371A1* [16]; в – Пирамидальная решетчатая башня. Патент *RU2165505C1* [17]; г – Сетчатая башня. Патент *RU2178494C1* [18]



Л. О. Кагановский предложил решение по усилению каркасной структуры башни с использованием вертикальных и горизонтальных элементов, что позволило увеличить ее несущую способность [19].

На рис. 2 представлены конструкции башен, защищенные патентами [20-23], которые дополняют и развивают перечисленные выше разработки.

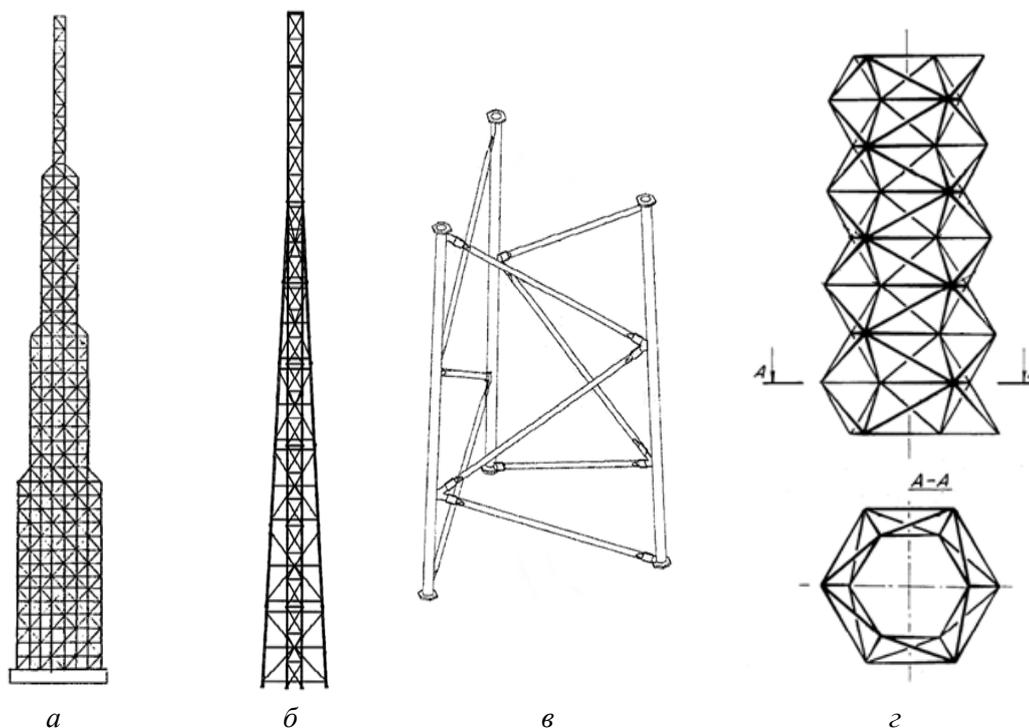


Рис. 2. Варианты башенных сооружений: *a* – Конструкция башни. Патент *RU52055U1* [21]; *б* – Высотное сооружение. Патент *RU2302503C2* [20]; *в* – Трехмерная ферменная структура башенного типа. Патент *RU2347048C1* [22]; *г* – Решетчатая башня. Патент *RU2052055C1* [23]

В последние десятилетия отечественные и зарубежные исследователи ведут работы по совершенствованию башенных конструкций [24-28]. Рассматриваются различные параметры башен и воздействий на них (конструктивные схемы, сечения элементов, ветровые нагрузки, динамические параметры, монтаж и эксплуатация и т.д.).

В работе А. В. Голикова и Д. В. Веремева [29] разработана инженерная методика определения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен, что обеспечивает возможность использования полученных результатов на этапе предпроектных разработок.

В исследовании [30] анализируется оптимизация конструктивной формы башен с предварительно напряженными затяжками. Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния конструкций методом конечных элементов.

Результаты исследования [31] показали, что минимальный вес конструкции достигается при использовании решетки типа X и XB для башен с треугольной формой в плане. Кроме того, раскрепление типа X и XB обеспечивает наилучшие показатели по деформативности (рис. 3).

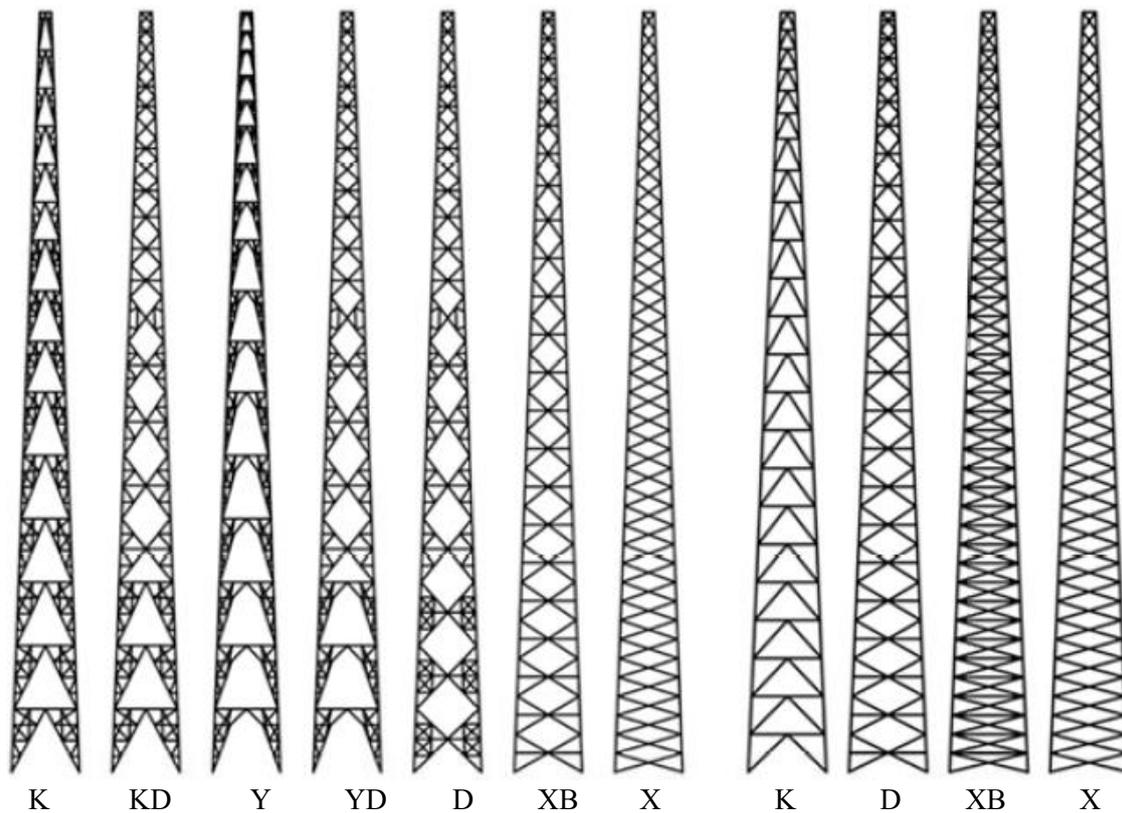


Рис. 3. Башни с различными вариантами решеток [31]

К аналогичным результатам пришли и *J. Szafran, K. Juszczyk-Andraszyk, P. Juszczyk* при рассмотрении вариантов решеток [32].

В публикациях [33-36] были проанализированы вопросы, связанные с действием гололедно-ветровых нагрузок на решетчатые башни. Авторы исследовали динамику высотных сооружений, опираясь на фундаментальные работы в теории колебаний: Н. К. Снитко [37], С. П. Тимошенко [38] и др. [39-41]. На основе проведенного анализа отдано предпочтение пирамидальной опоре с крестово-шпренгельной и крестовой решетками из уголковых профилей.

Авторы публикации [42] пришли к выводу, что при строительстве башен высотой до 200 м предпочтительнее использовать крестовую и ромбическую соединительные решетки. Исследования [43-44] также подтверждают эффективность крестовой решетки.

В статье Е. А. Михальчонок [45] установлено, что оптимальные параметры башен достигаются при соотношении высоты к ширине основания в диапазоне  $1/6-1/15H$ , а угол наклона раскосов должен составлять  $30-60^\circ$ . В исследовании [46] уточнено, что оптимальные углы наклона раскосов составляют  $68^\circ$  для треугольной решетки и  $63^\circ$  для раскосной решетки.

В своей работе Л. С. Сабитов и соавторы [47] рассматривают задачу выбора рационального типа поперечного сечения опор. Предложено аналитическое условие, которое гласит: если внешний изгибающий момент ( $M$ ) в сечении опоры превышает условный ( $M_{усл}$ ), то, с точки зрения экономии стали, предпочтительнее использовать решетчатое сечение. В противном случае, целесообразно применять сплошное сечение.



В исследованиях [48-49] предложено варьировать ширину башни по высоте, а также размеры поперечных сечений элементов. Было установлено, что метод внутренней точки является наиболее эффективным для решения задачи оптимизации, приводя к увеличению критической нагрузки в 2,3 раза по сравнению с башней постоянной ширины при тех же условиях массы.

С развитием вычислительных технологий и программного обеспечения появилась возможность использования топологической оптимизации (ТО) для проектирования сложных конструкций [50-56].

В публикации [57] были проведены 2D и 3D исследования ТО решетчатых башен, которые позволили сократить использование материала за счет оптимально расположенной системы раскосов (рис. 4).

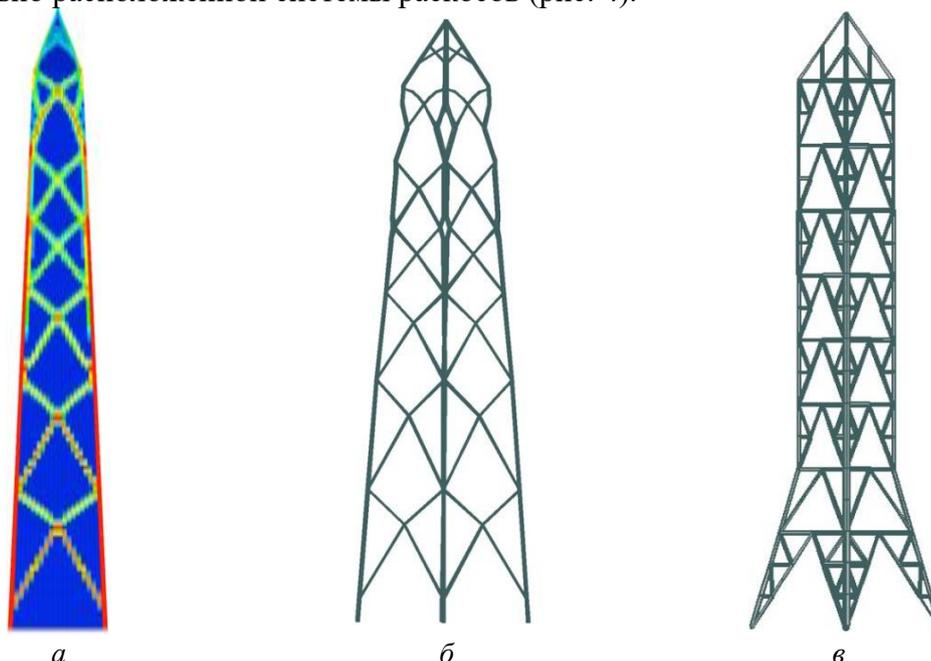


Рис. 4. ТО башенной конструкции: *а* – двухмерный график плотности элементов; *б* – модель оптимизированной башни; *в* – модель традиционной башни [57]

*F. Vlădulescu* и *D. M. Constantinescu* [58] провели исследование по оптимизации решетчатой башни. Установлено, что на эквивалентные напряжения значительно влияет длина раскосов, в то время как диаметр поясов оказывает меньшее влияние. Авторам удалось добиться уменьшения массы башни на 39% по сравнению с исходным проектом.

#### **Анализ и оптимизация поперечных сечений поясов башен**

Ключевыми аспектами оптимизации поясов являются: минимизация массы конструкции при сохранении или улучшении прочностных характеристик, снижение ветровой нагрузки за счет улучшения аэродинамических свойств, упрощение технологии изготовления и монтажа, а также повышение эксплуатационной надежности сооружений.

Одним из решений является трехгранная решетчатая башня, предложенная *Б. В. Остроумовым* и *С. Б. Остроумовым* [59]. Ее особенностью является использование поясов из корытообразного профиля с отгибом полок под углом  $60^\circ$  к основанию сечения. Такое решение упрощает процесс изготовления и снижает стоимость металлоконструкций.

Предлагаемая конструкция [60-61] включает пояса многогранного замкнутого сечения, изготовленные из листовой стали путем продольного изгиба, и стержни решетки, прикрепленные к листовым фасонкам. Оптимизация по осевому моменту инерции дала улучшение на 5,2% в сравнении с квадратными трубами.

В статье [62] рассматривается использование прокатных уголков с перьями, догнутыми до  $60^\circ$  (рис. 5). Было установлено, что несущая способность предлагаемых уголков на 5–20% выше по сравнению с традиционными уголками.

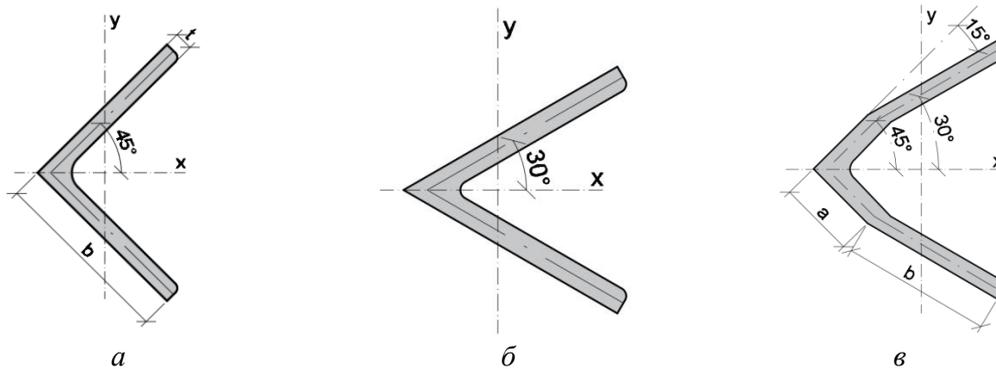


Рис. 5. Варианты исполнения пояса башни: *a* – традиционный 90-градусный уголок; *б* – 60-градусный уголок; *в* – прокатный уголок с перьями, догнутыми до  $60^\circ$  [62]

В статье [63] исследуется оптимизация башен из холодногнутых профилей. Модельные и численные исследования прототипа башни показали, что можно уменьшить вес конструкции более чем на 5%.

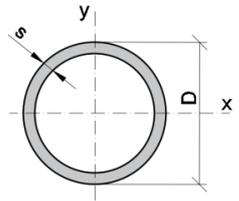
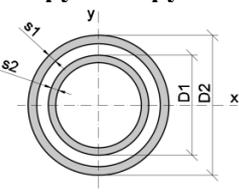
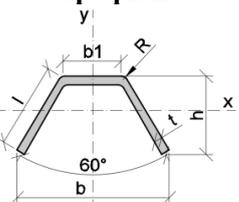
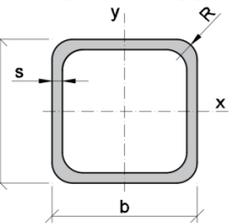
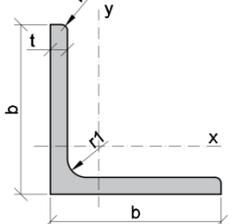
Применение методов численного моделирования и оптимизации, таких как МКЭ и нелинейное программирование, позволило разработать новые конфигурации поперечных сечений поясов, обеспечивающие улучшенные показатели по сравнению с традиционными решениями.

В таблице приведены сравнительные данные о поясах трехгранных башенных конструкций. Результаты позволяют оценить преимущества и недостатки различных решений при проектировании.

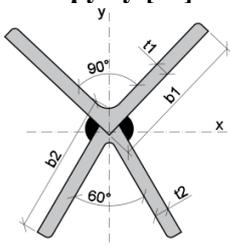
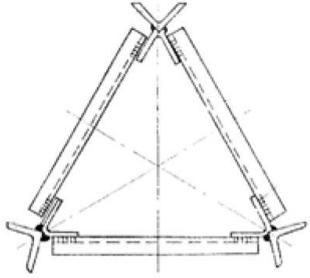
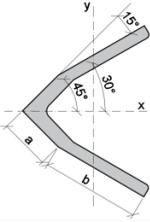
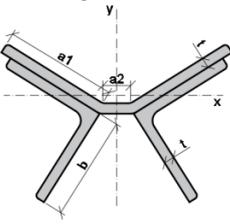
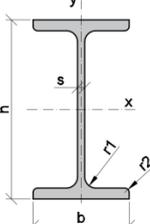
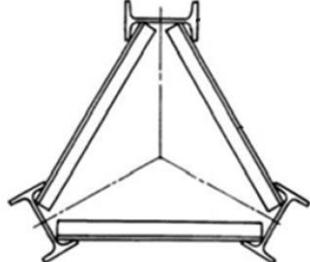
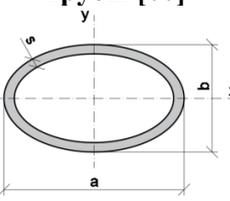
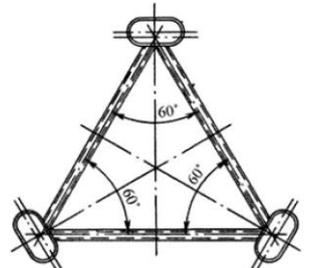


Таблица

**Анализ сечений поясов трехгранных башенных конструкций**

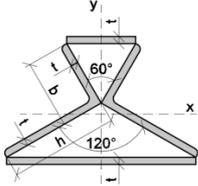
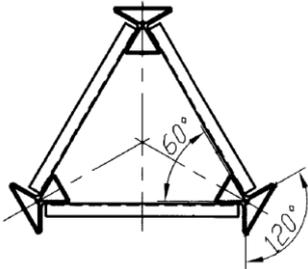
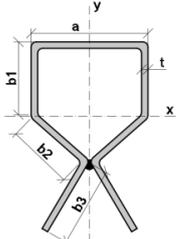
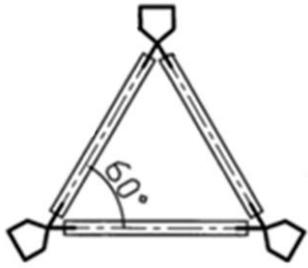
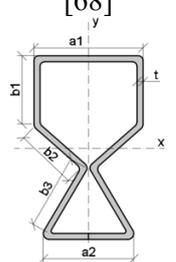
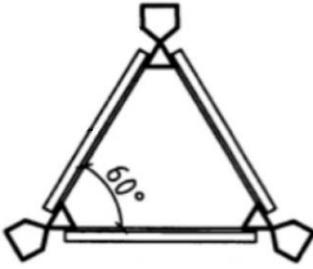
Форма сечения	Пример использования	Примечание
<p><b>Круглая труба</b></p> 		<p><u>Преимущества:</u> удобообтекаемая форма, широкая доступность;  <u>Недостатки:</u> сложность узловых соединений, требования к герметичности, высокая стоимость.</p>
<p><b>Труба в трубе</b></p> 		<p><u>Преимущества:</u> повышение жесткости и прочности конструкции без увеличения наветренной площади;  <u>Недостатки:</u> увеличение массы конструкции, сложность узловых соединений, требования к герметичности.</p>
<p><b>Холодногнутый корытообразный профиль</b></p> 		<p>Корытообразный профиль с отгибом полок под углом 60°.  <u>Преимущества:</u> удобство сборки, гибкость в проектировании, не требует прокатки или сварки в отличие от трубы;  <u>Недостатки:</u> малая жесткость на скручивание, менее аэродинамичная форма в сравнении с трубой.</p>
<p><b>Квадратная труба</b></p> 		<p><u>Преимущества:</u> профиль может использоваться в различных элементах башенной конструкции, доступность профиля;  <u>Недостатки:</u> меньшая аэродинамическая эффективность, более высокая стоимость изготовления по сравнению с круглой трубой, требования к герметичности, сложность узловых соединений.</p>
<p><b>Уголок</b></p> 		<p>Разница углов между отгибами перьев уголка и гранью башни компенсируется гибкими фасонками.  <u>Преимущества:</u> доступность профиля, простота узловых соединений;  <u>Недостатки:</u> низкая жесткость на кручение, менее аэродинамичная форма в сравнении с трубой.</p>

## Продолжение таблицы

<p><b>Уголки перьями наружу [64]</b></p> 		<p>Одиночные уголки, повернутые перьями наружу. Для объединения поясов и элементов решетки служат узловые угловые фасонки. <u>Преимущества:</u> доступность профиля; <u>Недостатки:</u> менее аэродинамичная форма в сравнении с трубой, наличие сварки обушка и угловой фасонки.</p>
<p><b>Уголок с догибом перьев [62]</b></p> 		<p>Перья горячекатанного уголка догибаются на 15° внутрь. <u>Преимущества:</u> упрощение узлов стыка решетки и поясов; <u>Недостатки:</u> ограниченная эффективность при кручении, увеличение стоимости изготовления.</p>
<p><b>Составные сечения из уголков</b></p> 		<p>Перья уголков расположены относительно друг друга под углом 60°. Совместная работа ветвей обеспечена гнутыми пластинами. <u>Преимущества:</u> упрощение узлов стыка решетки и поясов; <u>Недостатки:</u> увеличение наветренной площади, большое количество соединительных элементов.</p>
<p><b>Двутавр [65]</b></p> 		<p><u>Преимущества:</u> доступность профиля; <u>Недостатки:</u> увеличение наветренной площади, плохообтекаемая аэродинамическая форма в сравнении с трубой, сложность узловых соединений.</p>
<p><b>Плоскоовальные трубы [66]</b></p> 		<p>Плоскоовальная форма с отношением габаритных размеров 1/1,542. <u>Преимущества:</u> удобообтекаемый профиль, высокая устойчивость к кручению; <u>Недостатки:</u> недостаток оборудования для изготовления, усложнение сборки, сложность узловых соединений.</p>



## Окончание таблицы

<p><b>Решетчатые сечения</b></p>		<p><b>Преимущества:</b> экономия материала и пониженная наветренная площадь в сравнении со сплошными сечениями; <b>Недостатки:</b> большое количество элементов и соединений, трудоемкость изготовления.</p>
<p><b>Замкнутое сечение из неравнополочных уголков [67]</b></p> 		<p><b>Преимущества:</b> высокая жесткость на кручение, доступность уголкового профиля, простота узлов стыка решетки и пояса; <b>Недостатки:</b> наличие большого объема сплошной сварки для обеспечения герметичности, плохообтекаемая форма.</p>
<p><b>Многогранное замкнутое сечение с листовыми фасонками [61]</b></p> 		<p>Сечения изготавливаются из листовой стали путем продольного изгиба с отгибом кромок под углом <math>60^\circ</math> и сваркой в месте их контакта. <b>Преимущества:</b> Уменьшение расхода стали на 20–25%, снижение трудоемкости монтажа; <b>Недостатки:</b> наличие большого объема сплошной сварки для обеспечения герметичности, плохообтекаемая форма.</p>
<p><b>Замкнутый многогранный профиль с отгибами кромок [68]</b></p> 		<p>Сечения изготавливаются из листовой стали путемгиба, с отгибом кромок под углом <math>60^\circ</math> и их сварным соединением. <b>Преимущества:</b> Уменьшение расхода стали, снижение трудоемкости монтажа; <b>Недостатки:</b> наличие большого объема сплошной сварки для обеспечения герметичности, плохообтекаемая форма.</p>

Эволюция стальных решетчатых башен, начиная с инновационных работ В. Г. Шухова, демонстрирует непрерывное стремление к оптимизации конструкций. Это стремление нашло свое продолжение в современных методах проектирования, таких как численное моделирование и топологическая оптимизация.

Анализ различных конструктивных решений выявил, что наиболее эффективными с точки зрения соотношения прочности и материалоемкости



являются крестовые и ромбические решетки для четырехгранных и треугольных башен. Развивая эту тенденцию, инновационные решения в конструкции поясов, такие как корытообразные профили и многогранные замкнутые сечения, демонстрируют потенциал для дальнейшего снижения веса конструкции и упрощения монтажа.

Для продолжения прогресса в области проектирования стальных решетчатых башен необходим междисциплинарный подход, объединяющий достижения в материаловедении, компьютерном моделировании и строительных технологиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антенно-мачтовые сооружения сотовой связи: классификация, тенденции в строительстве, проблемы проектирования / М. Ю. Новиков, И. Д. Канаков, В. П. Калаев, П. Е. Манохин. – Текст : непосредственный // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2023. – Том 9, № 1. – С. 75–81.
2. Мельников, Н. П. Антенные сооружения (башни, мачты, радиотелескопы) / Н. П. Мельников. – Москва : Знание, 1969. – 48 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Соколов, А. Г. Радиобашни обтекаемого типа / А. Г. Соколов // Бюллетень строительной техники. – 1944. – № 5–6. – С. 11–16.
4. Савицкий, Г. А. Антенные сооружения / Г. А. Савицкий. – Москва : Изд-во и тип. Связьиздата, 1947. – 319 с. – Текст : непосредственный.
5. Савицкий, Г. А. Основы расчета радиомачт / Г. А. Савицкий. – Москва : Связьиздат, 1953. – 275 с. – Текст : непосредственный.
6. Соколов, А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование) / А. Г. Соколов. – Москва : Госстройиздат, 1961. – 171 с. – Текст : непосредственный.
7. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – Москва : Издательство литературы по строительству, 1972. – 111 с. – Текст : непосредственный.
8. Павловский, В. Ф. Стальные башни. Проектирование и монтаж / В. Ф. Павловский, М. П. Кондра. – Киев : Будівельник, 1979. – 200 с. – Текст : непосредственный.
9. Перельмутер, А. В. Становление и развитие ключевых идей проектирования высотных конструкций антенных сооружений / А. В. Перельмутер. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 1. – С. 10–20.
10. Гордеев, В. Н. О выборе оптимальных очертаний башни / В. Н. Гордеев, М. Л. Гринберг, М. П. Кондра. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 1969. – № 6. – С. 59–61.
11. Соколов, А. Г. Металлические конструкции антенных устройств / А. Г. Соколов. – Москва : Стройиздат, 1971. – 240 с. – Текст : непосредственный.
12. О применении демпфирующих устройств для гашения автоколебаний высоких сооружений башенного типа / И. М. Беспозванная, В. С. Гоздек, А. Н. Луговцов, Г. М. Фомин. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 1972. – № 6. – С. 40–43.
13. Кондра, М. П. Опыт применения динамических гасителей колебаний для виброзащиты башен / М. П. Кондра, Б. В. Остроумов. – Текст : непосредственный // Виброзащита в строительстве : международный симпозиум : доклады и сообщения. – Ленинград, 1984. – Том 2. – С. 33–34.
14. Корнев, Б. Г. Применение динамических гасителей колебаний для повышения долговечности и несущей способности телевизионных башен / Б. Г. Корнев, И. И. Ройтштейн. – Москва : Радио и связь, 1988. – Вып. 2. – С. 1–17. – Текст : непосредственный.



15. Авторское свидетельство № 787604 СССР, МПК E04H 12/08. Башня : № 2724098 : заявл. 12.02.1979 : опубл. 15.12.1980 / Goberman E. A., Strashenko B. F. ; заявитель Отделение дальних передач Всесоюзного государственного проектно-изыскательского института энергетических систем и электрических сетей. – 4 с. – Текст : непосредственный.

16. Авторское свидетельство № 1096371 СССР, МПК E04Y 12/08. Решетчатая башня : № 3523549 : заявл. 17.12.1982 : опубл. 07.06.1984 / Polotovskiy A. G. ; заявитель Государственный проектный институт «Ленпроектстальконструкция». – 4 с. – Текст : непосредственный.

17. Патент № 2165505 Российская Федерация, МПК E04H 12/08. Пирамидальная решетчатая башня : № 99120726 : заявл. 30.09.1999 : опубл. 20.04.2001 / Morozov E. P. ; заявитель Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций имени Н. П. Мельникова. – 10 с. – Текст : непосредственный.

18. Патент № 2178494 Российская Федерация, МПК E04H 12/08. Сетчатая башня : № 2001107720 : заявл. 26.03.2001 : опубл. 20.02.2002 / Ostroumov B. V. ; заявитель Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций имени Мельникова. – 11 с. – Текст : непосредственный.

19. Авторское свид. № 1265277 СССР, МПК E04H 12/08. Секционная решетчатая башня : № 3815711 : заявл. 27.11.1984 : опубл. 23.10.1986 / Kaganovskiy L. O. ; заявитель Государственный проектный и научно-исследовательский институт «УкрНИИпроектстальконструкция». – 3 с. – Текст : непосредственный.

20. Патент № 52055 Российская Федерация, МПК E04H 12/08. Конструкция башни : № 2004115301 : заявл. 20.05.2004 : опубл. 10.03.2006 / Moxov V. G., Kravtsov V. V. – 2 с.

21. Патент № 2302503 Российская Федерация, МПК E04H 12/10. Высотное сооружение : № 2005112830 : заявл. 27.04.2005 : опубл. 10.07.2007 / Vladimirovskiy zavod «Электрприбор» ; заявитель «Владимирский завод «Электрприбор». – 8 с.

22. Патент № 2347048 Российская Федерация, МПК E04H 12/08. Трехмерная ферменная структура башенного типа : № 2007119603 : заявл. 28.05.2007 : опубл. 20.02.2009 / Sedova N. M., Ryzkov A. A., Kotov I. A., Stotrep-Andersen U. ; заявитель Рамболь. – 14 с.

23. Патент № 2052055 Российская Федерация, МПК E04H 12/08. Решетчатая башня : № 5021412 : заявл. 04.12.1991 : опубл. 10.01.1996 / Biryuchevskiy N. D. ; заявитель Бирючевский Н. Д. – 8 с.

24. Golikov, A. Atypical structural systems for mobile communication towers / A. Golikov, V. Gubanov, I. Garanzha // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 21, Construction – The Formation of Living Environment, Moscow, 25–27 April 2018. – Vol. 365.

25. París, J. Structural Optimization of High Voltage Transmission Line Towers Considering Continuum and Discrete Design Variables / J. París, S. Martínez, F. Navarrina, I. Colominas, M. Casteleiro // OPTI2012 : Conference Proceedings. – 2012. – Vol. 125.

26. Голиков, А. В. Предварительно напряженные стальные башни цилиндрического сечения для мобильной связи 5G / А. В. Голиков, В. В. Губанов, В. И. Корсун, В. Г. Поляков. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 5. – С. 36–46.

27. Бадертдинов, И. Р. Напряженно-деформированное состояние трехгранных решетчатых конструкций / И. Р. Бадертдинов, И. Л. Кузнецов, Л. С. Сабитов. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 11. – С. 192–194.

28. Тарануха, Н. Л. Повышение эффективности проектирования антенно-мачтовых сооружений сотовой связи на основе оценки конструктивных решений / Н. Л. Тарануха, М. Ю. Новиков. – Текст : непосредственный // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2023. – Том 26, № 1. – С. 84–90.



29. Голиков, А. В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен / А. В. Голиков, Д. В. Веремеев. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – № 1 (90). – С. 14–32.
30. Ситников, И. Р. Рационализация конструктивной формы башен с предварительно напряженными затяжками / И. Р. Ситников, А. В. Голиков. – Текст : непосредственный // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – Том 15, № 3. – С. 182–192.
31. Tah, A. M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers / A. M. Tah, K. M. Alsilevanai, M. Özakça. // American Journal of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 5, No. 2. – P. 60–68.
32. Szafran, J. Optimization Analysis of a 62-Meter-High Steel Lattice Telecommunication Tower / J. Szafran, K. Juszczak-Andraszyk, P. Juszczak. // Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary Problems: Monograph from Scientific Seminar / Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, XXIX LSCE. – Gdańsk, 2023.
33. Алёхин, А. М. Влияние нагрузок и воздействий на выбор конструктивной формы узкобазой антенной опоры / А. М. Алёхин, М. В. Кроник, Е. В. Кирсанов. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2018. – Том 24, № 2. – С. 61–72.
34. Алёхин, А. М. Действительная работа антенных опор под действием гололедно-ветровых воздействий : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алёхин Андрей Михайлович ; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макеевка, 2009. – 198 с.
35. Алёхин, А. М. Численные исследования поведения антенных опор при действии гололедно-ветровых воздействий / А. М. Алёхин. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2008. – Том 14, № 3. – С. 189–199.
36. Шевченко, Е. В. Оптимальное проектирование башенных радиорелейных опор / Е. В. Шевченко, Н. Р. Жук, С. А. Удахин. – Текст : непосредственный // Вестник ДонНАСА. – 2004. – Вып. 2 (44). – С. 7–10.
37. Снитко, Н. К. Статическая устойчивость телевизионной стальной башни / Н. К. Снитко. – Текст : непосредственный // Исследования по теории сооружений. – Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1965. – Вып. 14. – С. 23–28.
38. Тимошенко, С. П. Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. – Москва : Наука, 1975. – 704 с. – Текст : непосредственный.
39. Кулябко, В. Разработка принципиально новых устройств гашения колебаний конструкций на основе расчетов нелинейных колебаний сооружений / В. Кулябко, А. Масловский, Д. Сартаков. – Текст : непосредственный // Theoretical Foundations in Civil Engineering, Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions. – Warsaw, 2009. – № 17. – С. 185–192.
40. Рабинович, И. М. Некоторые вопросы теории статически неопределимых ферм / И. М. Рабинович // Исследования по теории сооружений. – Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1959. – Вып. 8. – С. 485–498.
41. Сорокин, Е. С. Динамический расчет несущих конструкций зданий / Е. С. Сорокин. – Москва : Госстройиздат, 1956. – 337 с. – Текст : непосредственный.
42. Голиков, А. В. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни / А. В. Голиков, Е. А. Михальчонок, Ю. А. Мельникова. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона : сетевой научный журнал – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5891> (дата обращения: 06.08.2024).
43. Анализ конструктивной формы антенных опор радиорелейной связи / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, А. М. Алёхин [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2010. – Том. 16, № 1. – С. 41–50. – URL: <https://metal-constructions.ru/?p=2495> (дата обращения: 01.09.2024).



44. Золотухин, С. Н. Анализ конструктивной формы антенных опор радиорелейной связи / С. Н. Золотухин, Е. Ю. Калашникова. – Текст : непосредственный // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия "Высокие технологии. Экология". – 2011. – № 1. – С. 34–38.

45. Михальчонок, Е. А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи / Е. А. Михальчонок. – Текст : непосредственный // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета : тезисы докладов, Волгоград, 13–17 мая 2019 года / Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2019. – С. 392–393.

46. Бадертдинов, И. Р. Оптимальные геометрические параметры поперечного сечения трехгранных стальных опор / И. Р. Бадертдинов, И. Л. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2 (36). – С. 95–99.

47. Сабитов, Л. С. Выбор рационального типа поперечного сечения опор / Л. С. Сабитов, И. Л. Кузнецов, С. А. Пеньковцев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2014. – № 4 (32). – С. 90–94.

48. Ахтямова, Л. Ш. Оптимизация формы трехгранных решетчатых опор по критерию устойчивости / Л. Ш. Ахтямова, Б. М. Языев, А. С. Чепурненко, Л. С. Сабитов. – Текст : непосредственный // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Том 18, № 4. – С. 317–328.

49. Оптимизация прожекторной мачты в виде трехгранной решетчатой башни / Л. Ш. Ахтямова, И. О. Иващенко, Л. С. Сабитов, А. С. Чепурненко. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11.

50. Kentli, A. Topology Optimization Applications on Engineering Structures / A. Kentli // Truss and Frames - Recent Advances and New Perspectives. – 2019.

51. Topology Optimization of Cracked Structures Using Peridynamics / A. Kefal, A. Sohoul, E. Oterkus, M. Yildiz, A. Suleman. // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2019.

52. Kingman, J. J. Applications of Topology Optimisation in Structural Engineering: High-rise Buildings and Steel Components / J. J. Kingman, K. D. Tsavdaridis, V. V. Toropov // Jordan Journal of Civil Engineering. – 2015. – Vol. 9, No. 3. – P. 335–357.

53. Nicolaou, A. Topology Optimisation Study for the Design of Lattice Towers / A. Nicolaou, K. D. Tsavdaridis, E. Efthymiou // Proceedings of the 9th Hellenic National Conference of Steel Structures. – Larisa, Greece, 2017.

54. Gao, D. Y. Canonical Duality Theory for Topology Optimization // Canonical Duality Theory / ed. by D.Y. Gao et al. – Springer International Publishing AG, 2017. – P. 263–276. – (Advances in Mechanics and Mathematics ; Vol. 37).

55. Comparison of thermodynamic topology optimization with SIMP / D. R. Jantos, C. Riedel, K. Hackl, P. Junker // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2019. – Vol. 31. – P. 521–548.

56. Conceptual design of AM components using layout and geometry optimization / L. He, M. Gilbert, T. Johnson, T. Pritchard // Computers and Mathematics with Applications. – 2018.

57. Tsavdaridis, K. D. Topology Optimisation of Lattice Telecommunication Tower and Performance-Based Design Considering Wind and Ice Loads / K. D. Tsavdaridis, A. Nicolaou, A. D. Mistry // Structures. – 2020. – Vol. 27. – P. 2379–2399.

58. Vlădulescu, F. Tower Structure Optimization through Finite Element Analyses / F. Vlădulescu, D. M. Constantinescu // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 997.



59. Патент № 106912 Российская Федерация, МПК В04Н 12/08. Трехгранная решетчатая башня : № 2011117943: заявл. 05.05.2011 : опубл. 27.07.2011 / Остроумов Б. В., Остроумов С. Б. ; заявитель Остроумов Б. В., Остроумов С. Б. – 9 с.
60. Сабитов, Л. С. Оптимизация формы поперечного сечения поясов трехгранных решетчатых опор / Л. С. Сабитов, И. Р. Бадертдинов, А. С. Чепурненко. – Текст : непосредственный // Строительство и архитектура. – 2019. – Том 7, № 4. – С. 5–8.
61. Патент № 2584337 Российская Федерация, МПК Е04Н 12/10. Трехгранная решетчатая опора : № 2015105647 : заявл. 18.02.2015 : опубл. 20.05.2016 / Сабитов Л. С., Кузнецов И. Л., Бадертдинов И. Р. ; заявитель Инновационные технологии-КИСИ. – 6 с.
62. Prasad. Schifflerised angle sections for triangular-based communication towers / N. Prasad Rao, R. Balagopal, R. P. Rokade, S. J. Mohan // The IES Journal Part A : Civil & Structural Engineering. – 2013. – Vol. 6, Issue 3. – P. 189–198.
63. Yang, F. Some Advances in the Application of Weathering and Cold-Formed Steel in Transmission Tower / F. Yang, J. Han, J. Yang, Z. Li // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. – 2009. – Vol. 1, No. 1.
64. Авт. свид. №1546599 СССР, МПК Е04Н 12/08. Высотное сооружение : № 4404259 : заявл. 05.04.1988 : опубл. 28.02.1990 / Барык Я. С. ; заявитель Государственный проектный и научно-исследовательский институт «Укрниипроектстальконструкция». – 4 с.
65. Патент № 2378469 Российская Федерация, МПК Е04Н 12/10. Трехгранная решетчатая конструкция : № 2008140220: заявл. 09.10.2008 : опубл. 10.01.2010 / Кузнецов И. Л., Исаев А. В., Бадертдинов И. Р. ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального учреждения Казанский государственный архитектурно-строительный университет ФГОУ ВПО КазГАСУ. – 5 с.
66. Патент № 2664092 Российская Федерация, МПК Е04Н 12/10. Трехгранная решетчатая опора с поясами из плоскоовальных труб : № 2017132912 : заявл. 20.09.2017 : опубл. 15.08.2018 / Марутян А. С. ; заявитель Марутян А. С. – 10 с.
67. Патент № 2707898 Российская Федерация, МПК Е04Н 12/10. Трехгранная решетчатая опора : № 2019113023 : заявл. 26.04.2019 : опубл. 02.12.2019 / Бадертдинов И. Р., Сабитов Л. С., Кузнецов И. Л., Ахмятова Л. Ш., Мезиков А. К. ; заявитель Сабитов Л. С. – 8 с.
68. Патент № 2641354 Российская Федерация, МПК Е04Н 12/10. Трехгранная решетчатая опора : № 2016145699 : заявл. 22.11.2016 : опубл. 17.01.2018 / Сабитов Л. С., Кузнецов И. Л., Бадертдинов И. Р., Стрелков Ю. М. ; заявитель Сабитов Л. С. – 7 с.

**OBLETOV Evgeniy Nikolaevich, postgraduate student, senior teacher of the chair of theory of structures and technical mechanics<sup>1</sup>, engineer-designer<sup>2</sup>; TRYANINA Nadezhda Yurevna, candidate of technical sciences, professor of the chair of theory of structures and technical mechanics<sup>1</sup>; ZUBANOV Evgeniy Sergeevich, postgraduate student of the chair of building structures<sup>1</sup>; ZAYTSEVA Maria Gennadievna, student<sup>1</sup>**

#### **ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF STEEL LATTICE TOWER DESIGNS (REVIEW)**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: +7 (831) 430-54-96; e-mail: evg.obletov@gmail.com

<sup>2</sup>JSC “Soyuzstalkonstruktsiya”.

262, Gorky St., Nizhny Novgorod, 603155, Russia.

Tel.: +7 (831) 422-12-23; e-mail: soyzstal@mail.ru

*Key words:* steel lattice towers, optimization, structural form, chord cross-sections.



*The review considers the history and development of key ideas that determined the design solutions for high-rise structures of communication facilities. A detailed analysis of structure formation issues, grid types and cross-sections of tower belts is presented. The main attention is paid to the analysis of tower optimisation methods, including improvement of reliability, stability and reduction of material intensity.*

## REFERENCES

1. Novikov M. Yu., Kanakov I. D., Kalaev V. P., Manokhin P. E. Antenna-machtovye sooruzheniya sotovoy svyazi: klassifikatsiya, tendentsii v stroitelstve, problemy proektirovaniya [Antenna-mast structures of cellular communication: classification, trends in construction, design problems]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii [Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia]. 2023, № 1, P. 75–81.
2. Melnikov N. P. Antennnye sooruzheniya (bashni, machty, radioteleskopy) [Antenna structures (towers, masts, radio telescopes)]. Moscow, Znanie, 1969, 48 p.
3. Sokolov A. G. Radiobashni obtekaemogo tipa [Streamlined radio towers]. Byulleten stroitelnoy tekhniki [Construction Equipment Bulletin]. 1944, № 5–6, P. 11–16.
4. Savitskiy G. A. Antennnye sooruzheniya [Antenna structures]. Moscow, Svyazizdat, 1947, 319 p.
5. Savitskiy G. A. Osnovy rascheta radiomacht [Basics of Radio Mast Calculations]. Moscow, Svyazizdat, 1953, 275 p.
6. Sokolov A. G. Opory liniy predach (raschet i konstruirovaniye) [Transmission line supports (calculation and design)]. Moscow, Gosstroyizdat, 1961, 171 p.
7. Savitskiy G. A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load on structures]. Moscow, Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1972, 111 p.
8. Pavlovskiy V. F., Kondra M. P. Stalnye bashni. Proektirovaniye i montazh [Steel towers. Design and installation]. Kiev, Budivelnik, 1979, 200 p.
9. Perelmuter A. V. Stanovleniye i razvitiye klyuchevykh idey proektirovaniya vysotnykh konstruktsiy antennoykh sooruzheniy [Formation and development of key ideas for the design of high-rise structures of antenna structures]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo [Industrial and civil construction]. 2021, № 1, P. 10–20.
10. Gordeev V. N., Grinberg M. L., Kondra M. P. O vybere optimalnykh ochertaniy bashni [On the selection of optimal tower outlines]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and structural calculations]. 1969, № 6, P. 59–61.
11. Sokolov A. G. Metallicheskie konstruktsii antennoykh ustroystv [Metal structures of antenna devices]. Moscow, Stroyizdat, 1971, 240 p.
12. Besprozvannaya I. M., Gozdek V. S., Lugovtsov A. N., Fomin G. M. O primeneniye dempfiruyushchikh ustroystv dlya gasheniya avtokolebaniy vysokikh sooruzheniy bashennogo tipa [On the use of damping devices to suppress auto-oscillations of tall tower-type structures]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and structural calculations]. 1972, № 6, P. 40–43.
13. Kondra M. P., Ostroumov B. V. Opyt primeneniya dinamicheskikh gasiteley kolebaniy dlya vibrozashchity bashen [Experience of using dynamic vibration dampers for vibration protection of towers]. Vibrozashchita v stroitelstve. Mezhdunarodnyy simpozium. Doklady i soobscheniya [Vibration protection in construction. International symposium. Reports and communications.]. 1984, № 2, P. 33–34.
14. Korenev B. G., Roytshteyn I. I. Primeneniye dinamicheskikh gasiteley kolebaniy dlya povysheniya dolgovechnosti i nesuschey sposobnosti televizionnykh bashen [Application of dynamic vibration dampers to improve durability and load-bearing capacity of television towers]. Radio i svyaz [Radio and communication]. 1988, Vol. 2, P. 1–17.
15. Avtorskoye svidetelstvo № 787604 SSSR, MPK E04N 12/08. Bashnya [Tower]: № 2724098 : zayavl. 12.02.1979 : opubl. 15.12.1980 / Goberman E. A., Strashenko B. F. ;



zayavitel Otdelenie dalnikh peredach Vsesoyuznogo gosudarstvennogo proektno-izyskatelskogo instituta energeticheskikh sistem i elektricheskikh setey. – 4 p.

16. Avtorskoe svidetelstvo № 1096371 SSSR, MPK E04Y 12/08. Reshetchataya bashnya [Lattice Tower] : № 3523549 : zayavl. 17.12.1982 : opubl. 07.06.1984 / Polotovskiy A. G. ; zayavitel Gosudarstvennyy proektnyy institut «Lenproektstalkonstruktsiya». – 4 p.

17. Patent № 2165505 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/08. Piramidalnaya reshetchataya bashnya [Pyramidal lattice tower]: № 99120726 : zayavl. 30.09.1999 : opubl. 20.04.2001 / Morozov E. P. ; zayavitel Tsentralnyy nauchno-issledovatel'skiy i proektnyy institut stroitelnykh metallokonstruktsiy imeni N. P. Melnikova. – 10 p.

18. Patent № 2178494 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/08. Setchataya bashnya [Mesh tower]: № 2001107720 : zayavl. 26.03.2001 : opubl. 20.02.2002 / Ostroumov B. V. ; zayavitel Tsentralnyy nauchno-issledovatel'skiy i proektnyy institut stroitelnykh metallokonstruktsiy imeni Melnikova. – 11 p.

19. Avtorskoe svid. № 1265277 SSSR, MPK E04N 12/08. Sektsionnaya reshetchataya bashnya [Sectional lattice tower]: № 3815711 : zayavl. 27.11.1984 : opubl. 23.10.1986 / Kaganovskiy L. O. ; zayavitel Gosudarstvennyy proektnyy i nauchno-issledovatel'skiy institut «UkrNIiproektstalkonstruktsiya». – 3 p.

20. Patent № 52055 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/08. Konstruktsiya bashni [Tower construction]: № 2004115301 : zayavl. 20.05.2004 : opubl. 10.03.2006 / Mokhov V. G., Kravtsov V. V. – 2 p.

21. Patent № 2302503 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/10. Vysotnoe sooruzhenie [High-rise building]: № 2005112830 : zayavl. 27.04.2005 : opubl. 10.07.2007 / Vladimirskiy zavod «Elektropribor»; zayavitel Vladimirskiy zavod “Elektropribor”. – 8 p.

22. Patent № 2347048 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/08. Trekhmernaya fermennaya struktura bashennogo tipa [Three-dimensional tower-type truss structure]: № 2007119603 : zayavl. 28.05.2007 : opubl. 20.02.2009 / Sedova N. M., Ryzhkov A. A., Kotov I. A., Stotrep-Andersen U. ; zayavitel Rambol. – 14 p.

23. Patent № 2052055 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/08. Reshetchataya bashnya [Lattice Tower]: № 5021412 : zayavl. 04.12.1991 : opubl. 10.01.1996 / Biryuchevskiy N. D. ; zayavitel Biryuchevskiy N. D. – 8 p.

24. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 365.

25. París J., Martínez S., Navarrina F., Colominas I., Casteleiro M. Structural Optimization of High Voltage Transmission Line Towers Considering Continuum and Discrete Design Variables // OPTI2012: Conference Proceedings, 2012. Vol. 125.

26. Golikov A. V., Gubanov V. V., Korsun V. I., Polyakov V. G. Predvaritelno napryazhennyye stalnye bashni tsilindricheskogo secheniya dlya mobilnoy svyazi 5G [Prestressed cylindrical steel towers for 5G mobile communications] Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and civil engineering]. 2024, № 5, P. 36–46.

27. Badertdinov I. R. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie trekhgrannykh reshetchatykh konstruktsiy [Stress-strain state of triangular lattice structures]. Nauchno-tekhnicheskyy vestnik Povolzhya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. 2018, № 11, P. 192–194.

28. Taranukha N. L. Povyshenie effektivnosti proektirovaniya antenno-machtovykh sooruzheniy sotovoy svyazi na osnove otsenki konstruktivnykh resheniy [Improving the efficiency of designing antenna-mast structures for cellular communications based on the assessment of design solutions]. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova [Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova]. 2023, № 1, P. 84–90.

29. Golikov A. V., Veremeev D. V. Obobshchennyye printsipy komponovki i naznacheniya gabaritnykh razmerov trekhgrannykh reshetchatykh bashen [General principles of layout and assignment of overall dimensions of triangular lattice towers]. Vestnik Volgogradskogo



gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering]. 2023, № 1 (90), P. 14–32.

30. Sitnikov I. R. Ratsionalizatsiya konstruktivnoy formy bashen s predvaritelno napryazhennymi zatyazhkami [Rationalization of the structural form of towers with pre-stressed ties]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy* [Structural mechanics of engineering structures and buildings]. 2019, № 3, P. 182–192.

31. Tah A. M., Alsilevanai K. M., Özakça M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers // *American Journal of Civil Engineering*, 2017. Vol. 5 (2). P. 60–68.

32. Szafran J., Juszczak-Andraszyk K., Juszczak P. Optimization Analysis of a 62-Meter-High Steel Lattice Telecommunication Tower // *Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary Problems: Monograph from Scientific Seminar*. 2023.

33. Alyokhin A. M., Kronik M. V., Kirsanov E. V. Vliyaniye nagruzok i vozdeystviy na vybor konstruktivnoy formy uzkobazoy antennoy opory [The influence of loads and impacts on the choice of the design form of a narrow-base antenna support]. *Metallicheskie konstruktсий* [Metal structures]. 2018, Vol. 2, P. 61–72.

34. Alyokhin A. M. Deystvitelnaya rabota antennoy opor pod deystviem gololedno-etrovykh vozdeystviy [Actual operation of antenna supports under the influence of ice and wind] : spetsialnost 05.23.01. : diss. kand. tekhn. nauk. Donbasskaya natsionalnaya akademiya stroitelstva i arkhitektury. Makeevka, 2009, 198 p.

35. Alyokhin A. M. Chislennyye issledovaniya povedeniya antennoy opor pri deystvii gololyodno-etrovykh vozdeystviy [Numerical studies of the behavior of antenna supports under the influence of ice and wind]. *Metallicheskie konstruktсий* [Metal structures]. 2008, Vol. 3, P. 189–199.

36. Shevchenko E. V., Zhuk N. R., Udakhin S. A. Optimalnoye proektirovaniye bashennykh radioreleynykh opor [Optimal design of tower radio relay supports]. *Vestnik DonNASA* [DonNASA Bulletin]. 2004, Vol. 2 (44), P. 7–10.

37. Snitko N. K. Statischeckaya ustoychivost televizionnoy stalnoy bashni [Static stability of television steel tower] *Issledovaniya po teorii sooruzheniy* [Studies on the theory of structures] Moscow. Leningrad, Gosstroyizdat, 1965, Vol. 14, P. 23–28.

38. Timoshenko S. P. Prochnost i kolebaniya elementov konstruktсий [Strength and vibrations of structural elements]. Moscow, Science, 1975, 704 p.

39. Kulyabko V., Maslovskiy A., Sartakov D. Razrabotka printsipialno novykh ustroystv gasheniya kolebaniy konstruktсий na osnove raschetov nelineynykh kolebaniy sooruzheniy [Development of fundamentally new devices for damping vibrations of structures based on calculations of nonlinear vibrations of structures]. *Theoretical Foundations in Civil Engineering, Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions*. 2009, Vol. 17, P. 185–192.

40. Rabinovich I. M. Nekotorye voprosy teorii staticheski neopredelimykh ferm [Some questions of the theory of statically indeterminate trusses]. *Issledovaniya po teorii sooruzheniy* [Studies on the theory of structures] Moscow. Leningrad, Gosstroyizdat 1959, Vol. 8, P. 485–498.

41. Sorokin E. S. Dinamicheskiy raschet nesuschikh konstruktсий zdaniy [Dynamic calculation of load-bearing structures of buildings]. Moscow, Gosstroyizdat, 1956, 337 p.

42. Golikov A. V. Analiz vliyaniya tipa reshetki na raspredeleniye usily v elementakh bashni [Analysis of the influence of lattice type on the distribution of forces in tower elements]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5891> (accessed: 06.08.2024).

43. Gorokhov E. V., Vasylev V. N., Alyokhin A. M. [et al.] Analiz konstruktivnoy formy antennoy opor radioreleynoy svyazi [Analysis of the design form of antenna supports for radio relay communication]. *Metallicheskie konstruktсий* [Metal structures]. 2010, Vol. 1, P. 41–50. – URL: <https://metal-constructions.ru/?p=2495> (accessed: 01.09.2024).

44. Zolotukhin S. N., Kalashnikova E. Yu. Analiz konstruktivnoy formy antennoy opor radioreleynoy svyazi [Analysis of the design form of antenna supports for radio relay



communication]. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering]. 2011, Vol. 1, P. 34–38.

45. Mikhalchonok E. A. Opredelenie ratsionalnoy konstruktivnoy formy bashen sotovoy svyazi [Determination of rational design form of cellular communication towers]. Smotr-konkurs nauchnykh, konstruktorskiykh i tekhnologicheskikh rabot studentov Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Volgograd, 2019, P. 34–38.

46. Badertdinov I. R., Kuznetsov I. L. Optimalnye geometricheskie parametry poperechnogo secheniya trekhgrannykh stalnykh opor [Optimal geometric parameters of the cross-section of triangular steel supports]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. 2016, Vol. 2 (36), P. 95–99.

47. Sabitov L. S. Vybór ratsionalnogo tipa poperechnogo secheniya opor [Selection of a rational type of cross-section of supports]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorodskiy gos. arkh.-str. un-t. Nizhniy Novgorod, 2014, Vol. 4 (32), P. 90–94.

48. Akhtyamova L. Sh. Optimizatsiya formy trekhgrannykh reshetchatykh opor po kriteriyu ustoychivosti [Optimization of the shape of triangular lattice supports according to the stability criterion]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Construction mechanics of engineering structures and constructions]. 2022, Vol.18, № 4, P. 317–328.

49. Akhtyamova L. Sh., Ivashchenko I. O., Sabitov L. S., Chepurnenko A. S. Optimizatsiya prozhektornoy machty v vide trekhgrannoy reshetchatoy bashni [Optimization of a floodlight mast in the form of a triangular lattice tower]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. 2022, № 11.

50. Kentli A. Topology Optimization Applications on Engineering Structures // Truss and Frames - Recent Advances and New Perspectives, 2019.

51. Kefal A., Sohoulí A., Oterkus E., Yildiz M., Suleman A. Topology Optimization of Cracked Structures Using Peridynamics // Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2019.

52. Kingman J. J., Tsavdaridis K. D., Toropov V. V. Applications of Topology Optimisation in Structural Engineering: High-rise Buildings and Steel Components // Jordan Journal of Civil Engineering, 2015. Vol. 9, No. 3, P. 335–357.

53. Nicolaou A., Tsavdaridis K. D., Efthymiou E. Topology Optimisation Study for the Design of Lattice Towers // Proceedings of the 9th Hellenic National Conference of Steel Structures. – Larisa, Greece, 2017.

54. Gao D. Y. Canonical Duality Theory for Topology Optimization // Advances in Mechanics and Mathematics, 2017, Vol. 37. P. 263–276.

55. Jantos D. R., Riedel C., Hackl K., Junker P. Comparison of thermodynamic topology optimization with SIMP // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2019. Vol. 31. P. 521–548.

56. He L., Gilbert M., Johnson T., Pritchard T. Conceptual design of AM components using layout and geometry optimization // Computers and Mathematics with Applications. 2018.

57. Tsavdaridis K. D., Nicolaou A., Mistry A. D. Topology Optimisation of Lattice Telecommunication Tower and Performance-Based Design Considering Wind and Ice Loads // Structures. 2020. Vol. 27. P. 2379–2399.

57. Vlădulescu F., Constantinescu D. M. Tower Structure Optimization through Finite Element Analyses // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 997.

59. Patent № 106912 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B04N 12/08. Trekhgrannaya reshetchataya bashnya [Triangular lattice tower]: № 2011117943: zayavl. 05.05.2011 : opubl. 27.07.2011; zayavitel Ostroumov B. V., Ostroumov S. B. – 9 p.

60. Sabitov L. S., Badertdinov I. R., Chepurnenko A. S. Optimizatsiya formy poperechnogo secheniya poyasov trekhgrannykh reshetchatykh opor [Optimization of the cross-sectional shape of the belts of triangular lattice supports]. Stroitelstvo i arkhitektura [Construction and architecture]. 2019. Vol. 7, № 4. P. 5–8.



61. Patent № 2584337 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/10. Trekhgrannaya reshetchataya opora [Triangular lattice support]: № 2015105647 : zayavl. 18.02.2015 : opubl. 20.05.2016 / Sabitov L. S., Kuznetsov I. L., Badertdinov I. R. ; zayavitel Innovatsionnye tekhnologii-KISI. – 6 p.

62. Rao N. Prasad., Balagopal R., Rokade R. P., Mohan S. J. Schifflerised angle sections for triangular-based communication towers // The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering. 2013. Vol. 6, Issue 3. P. 189–198.

63. Yang F., Han J., Yang J., Li Z. Some Advances in the Application of Weathering and Cold-Formed Steel in Transmission Tower // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2009. Vol. 1, No. 1.

64. Avt. svid. №1546599 SSSR, MPK E04H 12/08. Vysotnoe sooruzhenie [High-rise building]: № 4404259 : zayavl. 05.04.1988 : opubl. 28.02.1990 / Baryk YA. S. ; zayavitel Gosudarstvennyy proektnyy i nauchno-issledovatel'skiy institut «Ukrniiproektstalkonstruksiya». – 4 p.

65. Patent № 2378469 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/10. Trekhgrannaya reshetchataya konstruktsiya [Triangular lattice construction]: № 2008140220: zayavl. 09.10.2008 : opubl. 10.01.2010 / Kuznetsov I. L., Isaev A. V., Badertdinov I. R. ; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo uchrezhdeniya Kazanskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet FGOU VPO KaZGASU. – 5 p.

66. Patent № 2664092 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/10. Trekhgrannaya reshetchataya opora s poiyasami iz ploskoovalnykh trub [Triangular lattice tower with flat-oval tubular chords]: № 2017132912 : zayavl. 20.09.2017 : opubl. 15.08.2018 / Marutyan A. S. ; zayavitel Marutyan A. S. – 10 p.

67. Patent № 2707898 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/10. Trekhgrannaya reshetchataya opora [Triangular lattice support]: № 2019113023 : zayavl. 26.04.2019 : opubl. 02.12.2019 / Badertdinov I. R., Sabitov L. S., Kuznetsov I. L., Akhmyatova L. SH., Mezikov A. K. ; zayavitel Sabitov L. S. – 8 p.

68. Patent № 2641354 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04N 12/10. Trekhgrannaya reshetchataya opora [Triangular lattice support]: № 2016145699 : zayavl. 22.11.2016 : opubl. 17.01.2018 / Sabitov L. S., Kuznetsov I. L., Badertdinov I. R., Strelkov YU. M. ; zayavitel Sabitov L. S. – 7 p.

© **Е. Н. Облетов, Н. Ю. Трянина, Е. С. Зубанов, М. Г. Зайцева, 2025**

Получено: 13.03.2025 г.