

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-22-1-53-66
EDN: INBMOW

Научная статья / Research article

Влияние асимметрии геометрии на пространственную работу башенных конструкций

Ю.Д. Маркина Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, *Нижний Новгород, Российская Федерация*

✉ poluektoff@bk.ru

Поступила в редакцию: 1 декабря 2025 г.

Доработана: 10 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 14 февраля 2026 г.

Аннотация. Трехгранные антенно-мачтовые сооружения с асимметричной нижней частью, выполненной в форме усеченной пирамиды с одним вертикальным поясом, характеризуются выраженной неравномерностью пространственной жесткости. Геометрическая асимметрия, усиленная эксплуатационной, влияет на деформационные и динамические характеристики конструкций и приводит к отличиям от классических симметричных башенных схем. Объектом исследования являются три эксплуатируемые башни высотой 70 м, построенные по единой конструктивной схеме, но различающиеся массой металлоконструкций, объемом оборудования и климатическими параметрами районов установки. Метод исследования основан на пространственном конечно-элементном моделировании с учетом нормативных ветровых воздействий и массовой инерции оборудования. Получены ключевые закономерности работы конструкций: максимальная податливость в направлении вертикальной грани; снижение горизонтальных перемещений на 9–18 % при ветровом воздействии в наклонные грани; концентрация изгибно-растягивающих усилий в нижних участках наклонных поясов; выраженная торсионно-изгибная составляющая собственных форм колебаний. Установлено влияние оборудования на деформативность и динамические параметры: добавленная масса снижает частоты первых изгибных форм на 16–20 % и торсионно-изгибных — на 10–15 %. Выявленные эффекты формируют комплексное представление о пространственной работе асимметричных трехгранных башен и служат основой для дальнейшего сопоставления с эквивалентными симметричными моделями.

Ключевые слова: трехгранная башня, МКЭ, НДС, ветровая нагрузка, собственные колебания, асимметричная решетчатая конструкция, деформационная жесткость, горизонтальные перемещения

Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Автор выражает благодарность генеральному директору ООО «ПРИЗМОНТ-МЕТАЛЛ» (Москва, Российская Федерация) Сергею Васильевичу Климовичу за предоставление технических данных по монтажу башен с асимметричной нижней частью в виде усеченной пирамиды с одним вертикальным поясом. Автор выражает признательность рецензентам за внимательный анализ и конструктивные замечания, позволившие повысить качество представленного материала.

Для цитирования: Маркина Ю.Д., Влияние асимметрии геометрии на пространственную работу башенных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2026. Т. 22. № 1. С. 53–66. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-1-53-66> EDN: INBMOW

Маркина Юлия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теории сооружений и технической механики, инженерно-строительный факультет, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), Российская Федерация, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; eLIBRARY SPIN-код: 4203-4240, ORCID: 0009-0006-7167-0652; e-mail: poluektoff@bk.ru

© Маркина Ю.Д., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Influence of Geometric Asymmetry on the Spatial Behavior of Tower Structures

Yulia D. Markina 

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, *Nizhny Novgorod, Российская Федерация*

✉ poluektoff@bk.ru

Received: December 1, 2025

Revised: February 10, 2026

Accepted: February 14, 2026

Abstract. Triangular antenna mast structures with an asymmetric lower part shaped as a truncated pyramid with a single vertical chord exhibit nonuniform spatial stiffness. Geometric and operational asymmetry affects their deformation and dynamic behavior, leading to deviations from classical symmetric tower systems. The research object comprises three operating 70 m towers built according to the same structural concept, but differing in structural mass, equipment configuration and climatic conditions. The analysis is based on three-dimensional finite element modelling that accounts for regulatory wind actions and the inertial mass of the equipment. The study identifies key response patterns. The towers demonstrate maximum lateral flexibility in the direction of the vertical face, while wind action toward inclined faces reduces horizontal displacements by 9–18%. Combined bending and tensile stress concentrates in the lower parts of the inclined chords, whereas lattice members operate with a significant reserve of capacity. Natural vibration analysis reveals a pronounced bending–torsion coupling in modes 3–5 due to asymmetric stiffness. Equipment mass lowers the frequencies of the first bending modes by 16–20% and the bending–torsion modes by 10–15%. The results provide a comprehensive understanding of the spatial behavior of asymmetric triangular towers and form the basis for comparison with an equivalent symmetric model.

Keywords: triangular tower, finite-element analysis, stress–strain state, wind load, natural vibrations, asymmetric lattice structure, deformation stiffness, horizontal displacements

Conflicts of interest. The author declares that there is no conflict of interest.

Acknowledgements. The author expresses his gratitude to Klimovich Sergey Vasilyevich, General Director of OOO PRISMONT-METAL (company in Moscow, Russian Federation), for providing technical data on the installation of towers with an asymmetric lower part in the form of a truncated pyramid with one vertical chord. The author expresses sincere gratitude to the reviewers for their careful evaluation of the manuscript and constructive comments that helped improve the quality of the presented work.

For citation: Markina Yu.D. Influence of geometric asymmetry on the spatial behavior of tower structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(1):53–66. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-1-53-66> EDN: INBMOW

1. Введение

Антенно-мачтовые сооружения (АМС) представляют собой высокие решетчатые пространственные конструкции, эксплуатируемые в условиях значительных ветровых воздействий. Их геометрическая форма, конфигурация решетки и тип поясов определяют напряженно-деформированное состояние конструкции, динамические характеристики и эксплуатационную надежность, что подтверждается рядом исследований, посвященных оптимизации и оценке жесткостных характеристик башенных конструкций. Так, в [1] выполнена топологическая оптимизация телекоммуникационной башни с учетом ветровых и гололедных нагрузок, что демонстрирует высокую чувствительность пространственной работы конструкции к геометрии решетки. Исследования [2] показали, что конфигурация стержневых элементов существенно влияет на распределение напряжений при повреждениях, что связано с глобальной устойчивостью каркаса. В [3] обоснована роль геометрических параметров при концептуальном проектировании телекоммуникационных конструкций, что подчеркивает важность выбора схемы поясов и решетки на ранних этапах.

Ветровая нагрузка является главным эксплуатационным фактором для таких сооружений, поэтому значительное число работ посвящено аэродинамике башен. Численные и экспериментальные исследования [4–6] показывают, что даже при регулярной геометрии решеток и гладких стержнях реальная картина обтекания характеризуется выраженной трехмерностью: чередованием зон повышенно-

Yulia D. Markina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), 68 Il'inskaya St, Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4203-4240, ORCID: 0009-0006-7167-0652; e-mail: poluektoff@bk.ru

го и пониженного давления, периодическим вихреобразованием и сильной зависимостью аэродинамических коэффициентов от угла атаки. Обобщенные данные [7–9] указывают, что телекоммуникационные башни обладают значительно более сложной аэродинамической реакцией, чем классические стержневые фермы, что связано как с плотностью решетки, так и с локальными препятствиями в виде антенн и оборудования. Работы [10–12] демонстрирует, что оценка ветровых воздействий должна учитывать вероятностную природу экстремальных скоростей ветра, что особенно важно для высоких гибких сооружений.

Динамические характеристики башен под действием ветра и сейсмике изучены в ряде работ. В [13] исследовались колебательные формы оффшорных платформ, показав, что неравномерность распределения масс приводит к усилению изгибно-крутильных форм колебаний. Аналогичные выводы для решетчатых башен представлены в [14; 15], где показана высокая чувствительность частот и форм к изменению массы оборудования и ветровой нагрузки. Вероятностные оценки динамического отклика телекоммуникационных конструкций, выполненные в [16–18], подтверждают, что асимметрия геометрии и нагрузки приводит к существенному изменению глобальных форм колебаний и возможному снижению устойчивости.

Важным фактором, влияющим на пространственную работу телекоммуникационных башен, является масса и конфигурация технологического оборудования. Размещение антенн, радиоблоков и волноводных систем не только увеличивает собственную массу конструкции, но и формирует дополнительные ветровые площади, изменяя реакцию башни при действии горизонтальных нагрузок. В численных [19–21] и экспериментальных исследованиях [22; 23] показано, что оборудование способно существенно изменять распределение инерционных сил, смещать центр масс башни и усиливать изгибно-крутильные деформации ствола. Эти работы подчеркивают, что асимметричное расположение антенн приводит к различной степени вовлечения поясов и решетки при действии ветра, а увеличение массы оборудования снижает частоты изгибных форм и увеличивает перемещения в направлении наименьшей жесткости.

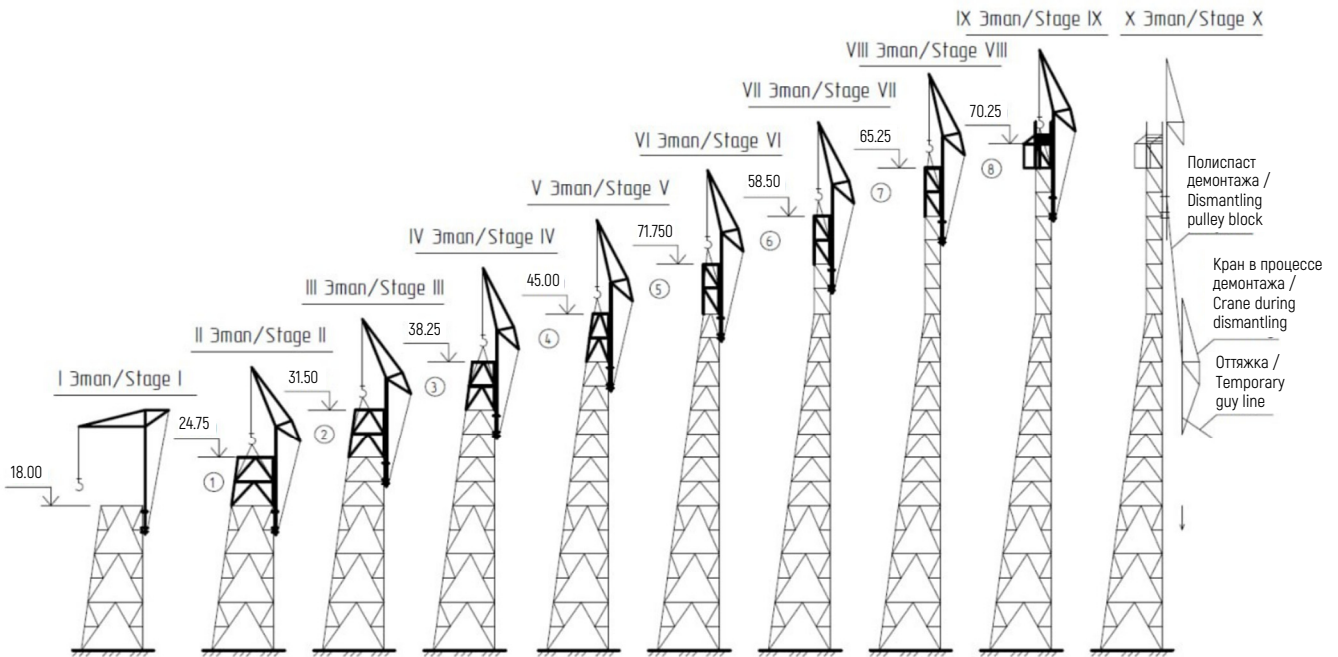
Одним из специализированных типов АМС является трехгранная решетчатая башня, нижняя часть которой имеет форму трехгранной усеченной пирамиды с одним вертикальным и двумя наклонными поясами. Такая форма применяется из-за особенностей технологии монтажа: вертикальный пояс обеспечивает возможность последовательного подъема самоподъемного крана вдоль ребра, что упрощает монтаж блоков (рис. 1). Однако данное конструктивное решение существенно изменяет пространственную работу сооружения по сравнению с классическими правильными трехгранными пирамидами. Асимметрия нижнего блока приводит к неравномерному распределению жесткости в продольном направлении, различной степени вовлечения поясов и решетки при действии ветра и формирует выраженный торсионный компонент в изгибно-крутильных формах колебаний. Несмотря на распространенность таких конструкций, их динамическое поведение и особенности работы под действием ветровых нагрузок остаются неизученными. Нормативные документы и публикации ориентированы на симметричные геометрические схемы, тогда как трехгранные АМС с вертикальным поясом обладают иными характеристиками жесткости и динамического отклика. Требуются специализированные исследования, направленные на выявление влияния геометрической и эксплуатационной асимметрии именно для такого типа трехгранных башен.

Объектом исследования является металлическая трехгранная башня антенно-мачтового типа высотой 70 м с асимметричной геометрией нижней части ствола — с одним вертикальным поясом и двумя наклонными.

Цель исследования — выявление особенностей пространственной работы и динамического поведения трехгранных АМС с асимметричной нижней частью в виде усеченной пирамиды с одним вертикальным поясом.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) построение и верификация конечно-элементных моделей трех эксплуатируемых трехгранных АМС с асимметричной геометрией нижнего блока;



a



b



v

Рис. 1. Монтаж башни самоподъемным краном:

a — технологическая схема монтажа; *b* — подготовка к Этапу I — навеске самоподъемного крана;

v — Этап IX — установка самоподъемным краном верхнего блока башни

Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной, А.А. Маркиным.

Figure 1. Tower installation using a self-erecting crane:

a — technological scheme of installation; *b* — preparation for Stage I: attaching the self-erecting crane;

v — Stage IX: lifting and installing the upper tower block with a self-erecting crane

Source: made by Yu.D. Markina, A.A. Markin.

2) анализ горизонтальных перемещений ствола башен при различных направлениях ветровой нагрузки;

3) определение и сравнение коэффициентов использования элементов для разных направлений ветра и условий эксплуатации;

4) определение собственных частот и форм колебаний и анализ их чувствительности к асимметрии конструкции и наличию оборудования;

5) выявление закономерностей влияния асимметрии нижнего блока на жесткостные и динамические характеристики сооружений;

6) подготовка базы для дальнейшего сравнения исследованных башен с эквивалентной симметричной конструкцией.

2. Методы

Исследование выполнено методом численного моделирования напряженно-деформированного состояния трех эксплуатируемых башен связи высотой 70 м (рис. 2). Каждая башня представляет собой пространственную стержневую конструкцию, внешне образующую трехгранную усеченную пирамиду с одним вертикальным поясом (до +45,000 м) и трехгранную призму в верхней части. Пояса выполнены из труб, в плоскости граней расположена решетка из труб и швеллеров. Несмотря на общность конструктивной схемы, исследуемые башни различаются рядом параметров. К таким различиям относятся отдельные геометрические характеристики, сечения части поясов и элементов решетки, состав и расположение вспомогательных конструкций, масса и конфигурация установленного антенно-фидерного оборудования. Основные конструктивные параметры приведены в табл. 1.



Рис. 2. Общий вид объектов исследования:

a — Б1; *б* — Б2; *в* — Б3

Источники: выполнено А.А. Маркиным.

Figure 2. General view of the research objects:

a — Т1; *б* — Т2; *в* — Т3

Source: made by A.A. Markin.

Таблица 1. Основные характеристики конструктивного решения башен
Table 1. Main structural characteristics of the tower design

№ / No.	Наименование характеристики / Name of characteristic	Значение / Value
1	Высота металлической башни, м / Height of the steel tower, m	70,00
2	Размеры граней, м / Face widths, m	8,50–2,50
3	Высота расположения диафрагм жесткости, м / Elevation of stiffening diaphragms, m	+6,000, +12,000, +18,000, +21,375, +24,750, +31,500, +68,625
4	Высота расположения переходных, технологических площадок и площадок для установки огней «ЗОМ», м / Elevation of transition and service platforms and aircraft warning light platforms, m	+6,000, +18,000, +24,750, +38,250, +51,750, +65,250, +68,625

Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной / Source: made by Yu.D. Markina.

Расчетные исследования выполнены автором в программном комплексе SCAD Office с использованием метода конечных элементов в рамках поверочных расчетов несущей способности конструкций опор с учетом размещенного и планируемого к установке антенно-фидерного оборудования. Для моделирования несущей системы использовались пространственные стержневые конечные элементы типа 5 «Пространственный стержень», обладающие шестью степенями свободы в узле (UX, UY, UZ, RX, RY, RZ). Данный тип элемента основан на аппроксимации изгиба по модели Эйлера — Бернулли с учетом сдвига по теории Тимошенко и обеспечивает корректное представление изгибных, продольных и крутильных деформаций тонкостенных трубчатых элементов, характерных для решетчатых АМС. Использование стержневых элементов позволяет достигать требуемой точности расчета при существенно меньшей вычислительной размерности модели по сравнению с пластинчатыми и объемными конечными элементами, что делает данный подход наиболее рациональным для пространственных решетчатых конструкций [25]. Стержневые элементы также соответствуют нормативной методике расчета решетчатых башен¹. Модель фундамента принята абсолютно жесткой, для узлов у основания заданы нулевые перемещения и повороты по всем степеням свободы.

Модели включают полный набор постоянных и временных нагрузок согласно требованиям Свода правил Российской Федерации СП 20.13330.2016²: собственный вес конструкций и навесного оборудования, гололедную и ветровую нагрузки. Ветровое воздействие моделировалось как распределенная нагрузка вдоль поясов. Рассматривались три направления ветрового воздействия: в грань W1, вдоль грани W2 и от грани W3 (рис. 3). Выбор ненормативных направлений (согласно СП 20.13330.2016³ для трехгранных опор является обязательным рассмотрение только ветра в грань W1, остальные направления не регламентированы) обусловлен тем, что при W2 и W3 могут формироваться максимальные усилия в элементах решетки и определяющие отрывные реакции фундаментов. Основным расчетным сочетанием является комбинация полной ветровой нагрузки с постоянными. Расчет выполнялся в линейной постановке. Корректность результатов подтверждается сопоставимостью с результатами более ранних поверочных расчетов несущей способности этих же башен, выполненных в рамках экспертизы опор до переоборудования. Эксплуатационные параметры башен приведены в табл. 2.

Влияние вертикальной грани оценивалось по относительному снижению перемещений при ветре в наклонные грани Г2 и Г3 относительно Г1. Под снижением перемещений понимается относительное уменьшение горизонтального перемещения при действии ветра в наклонные грани Г2 или Г3 по

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. 154 с.; ENV 1993-1-3 EuroCode 3: Design of steel structures. Part 1–3: General rules. Supplementary rules for cold formed thin gagemembers and sheeting. European Committee for Standardisation CEN. Brussels, 1996; Wind Actions on Structures: ISO 4354:2009. [2009-06-04]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2009. 68 p.

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. 154 с.

³ Там же.

сравнению с перемещением при ветре в вертикальную грань Г1. Показатель выражается в процентах и определяется как

$$\Delta\delta = \frac{\delta_{\Gamma 1} - \delta_{\Gamma i}}{\delta_{\Gamma 1}} 100\%,$$

где $\delta_{\Gamma 1}$ — горизонтальное перемещение при ветровом воздействии в грань Г1; $\delta_{\Gamma i}$ — перемещение при ветре в грань Г2 или Г3.

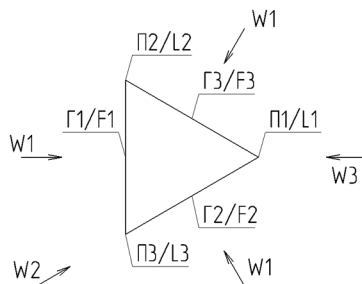


Рис. 3. Рассматриваемые направления ветра по отношению к конструкции:

W1 — в грань; W2 — вдоль грани; W3 — от грани; П1 — вертикальный пояс;
 П2 и П3 — наклонные пояса; Г1 — наклонная грань, противолежащая поясу П1;
 Г2 и Г3 — вертикальные грани, противолежащие поясам П2 и П3

И с т о ч н и к: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 3. Considered wind directions relative to the structure:

W1 — towards the face; W2 — along the face; W3 — away from the face;
 L1 — vertical chord; L2 and L3 — inclined chords; F1 — inclined face opposite to chord L1;
 F2 and F3 — vertical faces opposite to chords L2 and L3

S o u r c e: made by Yu.D. Markina.

Таблица 2. Эксплуатационные параметры башен / Table 2. Operational parameters of the towers

—	Б1/Г1	Б2/Г2	Б3/Г3
Область Российской Федерации / Region of the Russian Federation	Нижегородская / Nizhny Novgorod	Рязанская / Ryazan	Нижегородская / Nizhny Novgorod
Ветровой район / Wind region	II	I	I
Тип местности / Terrain category	A	A	A
Гололедный район / Icing region	II	II	III
Сейсмичность района, баллы / Seismicity of the area, points	< 6	< 6	< 6
Коэффициент надежности по ответственности / Partial safety factor with respect to importance	1	1	1
Вес конструкции, т / Weight of the steel structure, t	16,04	16,79	18,13
Вес оборудования, т / Weight of equipment, t	3,17	5,09	2,72
Суммарная ветровая нагрузка, тс / Total wind load, tf	6,97	5,50	6,95

И с т о ч н и к: выполнено Ю.Д. Маркиной / S o u r c e: made by Yu.D. Markina.

Положительные значения характеризуют уменьшение перемещений, а отрицательные — их увеличение относительно базового случая ветра в грань Г1.

Собственные частоты определялись для первых десяти форм колебаний, включающих изгибные, торсионные и локальные формы.

Для всех трех башен выполнено сопоставление:

- абсолютных перемещений;
- процентного снижения перемещений;

- максимальных коэффициентов использования;
- периодов собственных колебаний.

Методический подход в данном исследовании представляет собой последовательную процедуру численного анализа, включающую четыре ключевых компонента:

1) моделирование пространственной работы башни при трех направлениях ветровой нагрузки: нормативном (W1) и двух ненормативных (W2, W3);

2) учет как геометрической асимметрии конструкции, так и эксплуатационной асимметрии, обусловленной массой и размещением оборудования;

3) сопоставительный расчет трех башен, построенных по одной конструктивной схеме, что позволяет выявить универсальные закономерности и исключить влияние индивидуальных особенностей объектов;

4) использование нормированного показателя снижения перемещений, позволяющего количественно оценить вклад асимметрии в пространственное поведение конструкций независимо от абсолютных значений нагрузок и жесткостей.

Таким образом, расчетные процедуры объединены в единую логически полную схему анализа влияния асимметрии геометрии на пространственную работу трехгранных башен.

3. Результаты и обсуждение

Анализ эксплуатационных параметров и расчетных данных трех башен связи показал, что при сходной геометрии несущего ствола конструкции обладают схожими закономерностями пространственной работы, несмотря на различия в массе металлоконструкций, количестве и размещении оборудования. Наибольшее ветровое воздействие приходится на башни Б1 и Б3 (6,97 и 6,95 тс), тогда как Б2, расположенная в I ветровом районе, испытывает меньшую нагрузку (5,50 тс). Тем не менее именно Б2 имеет максимальные коэффициенты использования по поясам, раскосам и анкерным болтам (табл. 3) вследствие наибольшей массы установленного оборудования (5,09 т), создающего дополнительную нагрузку и смещающего центр тяжести конструкции.

Таблица 3. Максимальные коэффициенты использования элементов башен
Table 3. Maximum Utilization Rates of Tower Elements

Максимальный коэффициент использования / Maximum utilization factor	Б1/Т1	Б2/Т2	Б3/Т3
Поясов (высотная отметка элемента, м) / Chords (elevation of the element, m)	0,78 (+3,000)	0,97 (+0,000)	0,7 (+0,000)
Раскосов (высотная отметка элемента, м) / Braces (elevation of the element, m)	0,40 (+45,000)	0,52 (+45,000)	0,36 (+45,000)
Распорок (высотная отметка элемента, м) / Struts (elevation of the element, m)	0,55 (+48,375)	0,28 (+38,250)	0,19 (+45,000)
Болтов анкерных групп / Anchor bolt groups	0,71	0,90	0,62
Деформационное условие / Deformation criterion	0,48	0,16	0,24

Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной / Source: made by Yu.D. Markina.

Наименьшие коэффициенты использования в элементах решетки (раскосах и распорках) наблюдаются у Б3, что объясняется ее большей массой металлоконструкций (18,13 т) и, соответственно, повышенной жесткостью. Башня Б1 занимает промежуточное положение по прочностным критериям, однако характеризуется наибольшей податливостью по деформациям, что согласуется с распределением оборудования по высоте.

По результатам анализа несущей способности установлено, что критические состояния во всех трех башнях формируются исключительно по первой группе предельных состояний в элементах по-

ясов и анкерных соединений. Наибольшие изгибно-растягивающие усилия развиваются в нижней зоне наклонных поясов (0–6 м) при ветровом воздействии в вертикальную грань (Г1). Элементы решетки (раскосы и распорки) во всех сценариях работают с существенным запасом. Проверки по второй группе предельных состояний также не являются определяющими — горизонтальные перемещения находятся в пределах допуска, что подтверждает достаточную эксплуатационную жесткость всех трех объектов.

Анализ перемещений (рис. 4–6) выявил устойчивую закономерность: для всех башен максимальные горизонтальные перемещения формируются при ветровом воздействии в вертикальную грань (Г1). Ветер, действующий перпендикулярно вертикальной грани Г1, загружает конструкцию в направлении, где жесткость минимальна. Это связано с работой поясов: вертикальный пояс, формирующий грань Г1, не создает распорного эффекта, в то время как два наклонных пояса обеспечивают пространственную устойчивость за счет V-образной схемы. При действии ветра в наклонные грани (Г2, Г3) относительное снижение перемещений увеличивается с высотой, достигая 9–18 % в верхней части ствола. В нижней зоне до 14,23 м он крайне нестабилен и колеблется от –250 до 100 %, далее стабилизируется и плавно снижается на 1–5 % к отметке перелома пояса на высоте 45 м, после чего скорость снижения плавно возрастает и к верхней отметки башни 70 м падает еще на 5–8 %. Различие перемещений при ветровом воздействии на грани Г2 и Г3 объясняется эксплуатационной асимметрией башни, связанной с неравномерным размещением оборудования, площадок обслуживания, лестниц и кабельных трасс. Полная симметрия работы при ветре в Г2 и Г3 не достигается даже без оборудования за счет асимметрично расположенных вспомогательных элементов: площадок, лестницы, кабельного лотка.

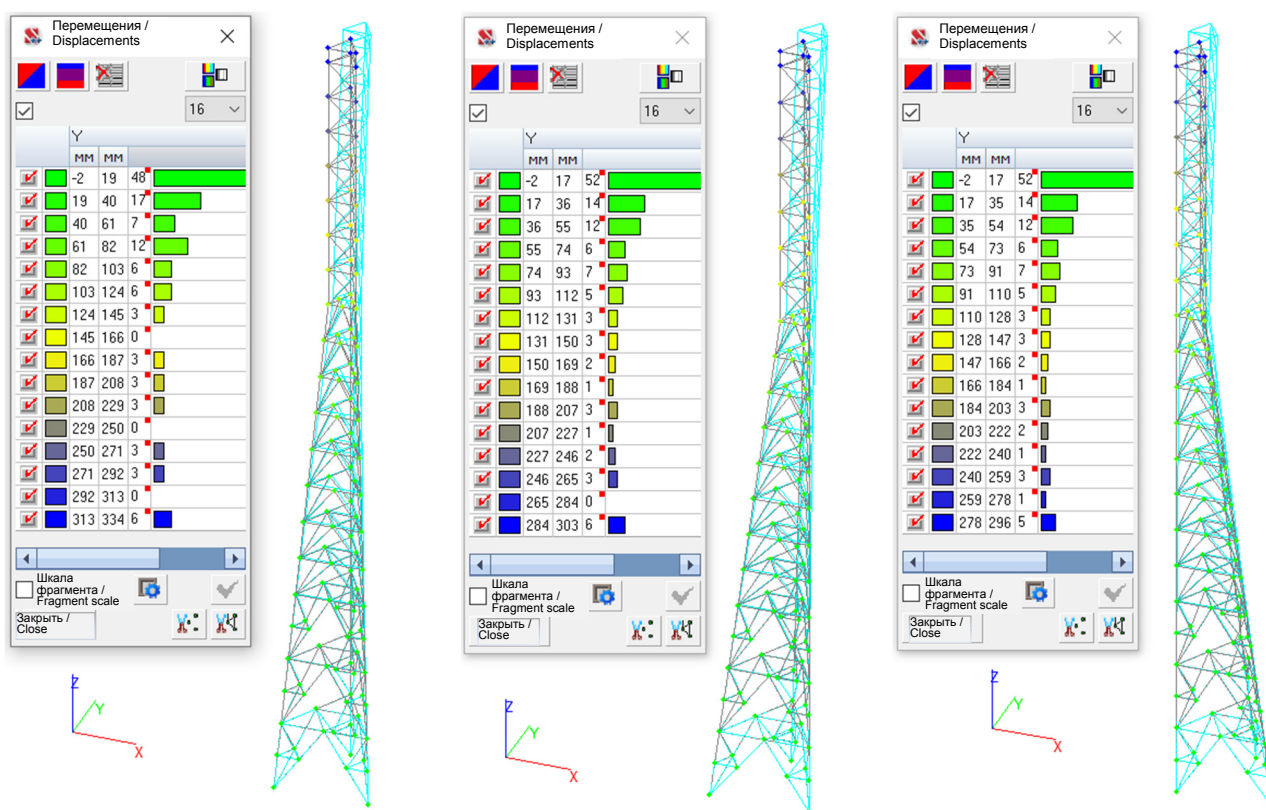


Рис. 4. Цветовая индикация величин горизонтальных перемещений в узлах башни Б1 при направлении ветра в грань W1 с учетом оборудования:

a — в грань Г1; *б* — в грань Г2; *в* — в грань Г3

Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 4. Color-coded horizontal displacements of nodes of Tower T1 under wind direction W1 with equipment:

a — towards face F1; *б* — towards face F2; *в* — towards face F3

Source: made by Yu.D. Markina.

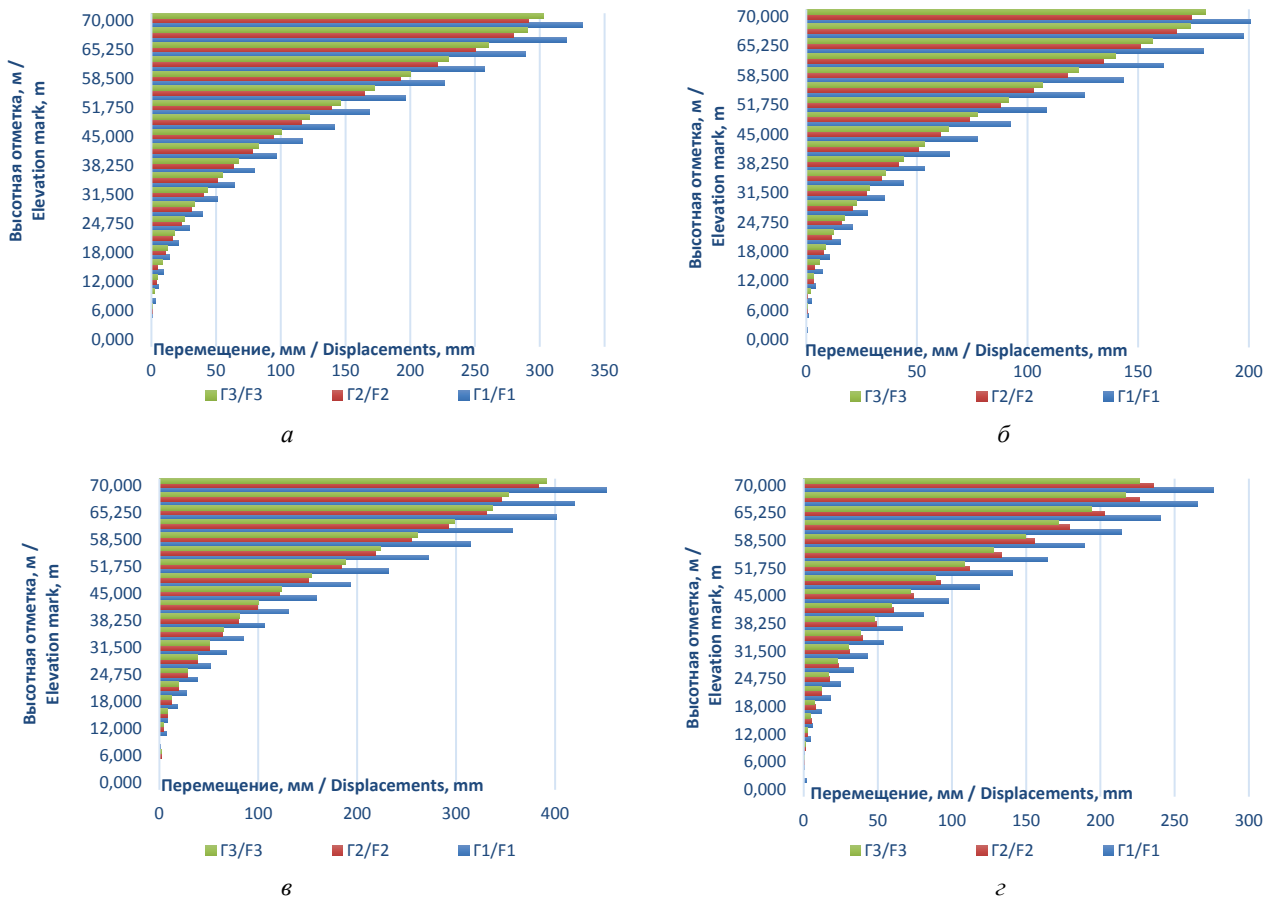


Рис. 5. Перемещения при направлении ветра в грань W1:
 а — для Б1 с оборудованием; б — для Б1 без оборудования; в — для Б2; г — для Б3
 Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 5. Displacements under wind direction W1:
 а — T1 with equipment; б — T1 without equipment; в — T2; г — T3
 Source: made by Yu.D. Markina.

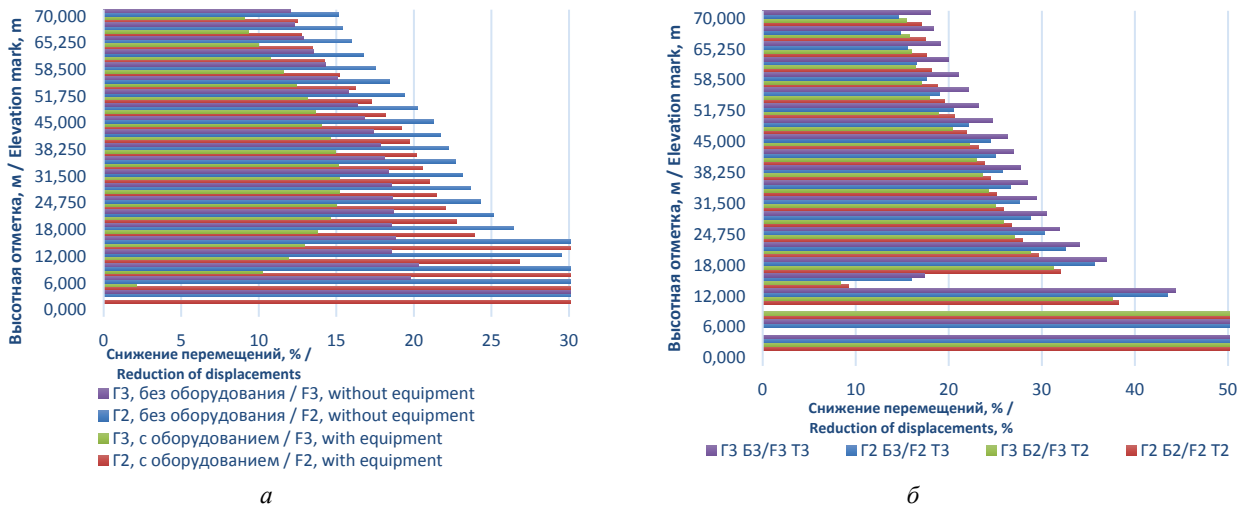


Рис. 6. Снижение горизонтальных перемещений при направлении ветра в грань W1:
 а — для Б1; б — для Б2 и Б3
 Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 6. Reduction of horizontal displacements under wind direction W1:
 а — T1; б — T2 and T3
 Source: made by Yu.D. Markina.

Вариант с оборудованием имеет важную особенность: несмотря на общее увеличение перемещений, коэффициент снижения перемещений становится на 3–4 % меньше по высоте. Дополнительная масса и ветровые площади оборудования перераспределяют жесткость и инерционные характеристики конструкции. По сравнению с вариантом без оборудования изгибная форма ствола изменяется: в средней части башни формируется выраженная S-образная форма, обусловленная увеличением гибкости под действием добавленных масс.

В табл. 4 приведены периоды первых десяти форм собственных колебаний башен. Первый столбец содержит порядковый номер формы колебаний, соответствующий результатам модального анализа конечно-элементной модели. Второй столбец показывает периоды колебаний башни Б1 с учетом установленного оборудования. Третий столбец содержит значения для той же башни без оборудования, что позволяет оценить влияние дополнительной массы и ветровых площадей. Четвертый и пятый столбцы представляют периоды колебаний башен Б2 и Б3 соответственно. Анализ периодов (табл. 4) и форм (рис. 7) собственных колебаний, классифицированных по горизонтальным перемещениям и угловым поворотам узлов, подтверждает ключевую роль геометрической асимметрии и эксплуатационной нагрузки. Для Б1 включение оборудования снижает частоты первых двух изгибных форм на 16–20 %, а торсионно-изгибных форм 3–6 — на 10–15 %. У башни Б2 наблюдаются наибольшие периоды собственных колебаний, что связано с сочетанием максимальной массы оборудования и минимальной ветровой нагрузки для I ветрового района. Б3 занимает промежуточное положение — большая масса металлоконструкций увеличивает ее жесткость, компенсируя влияние оборудования.

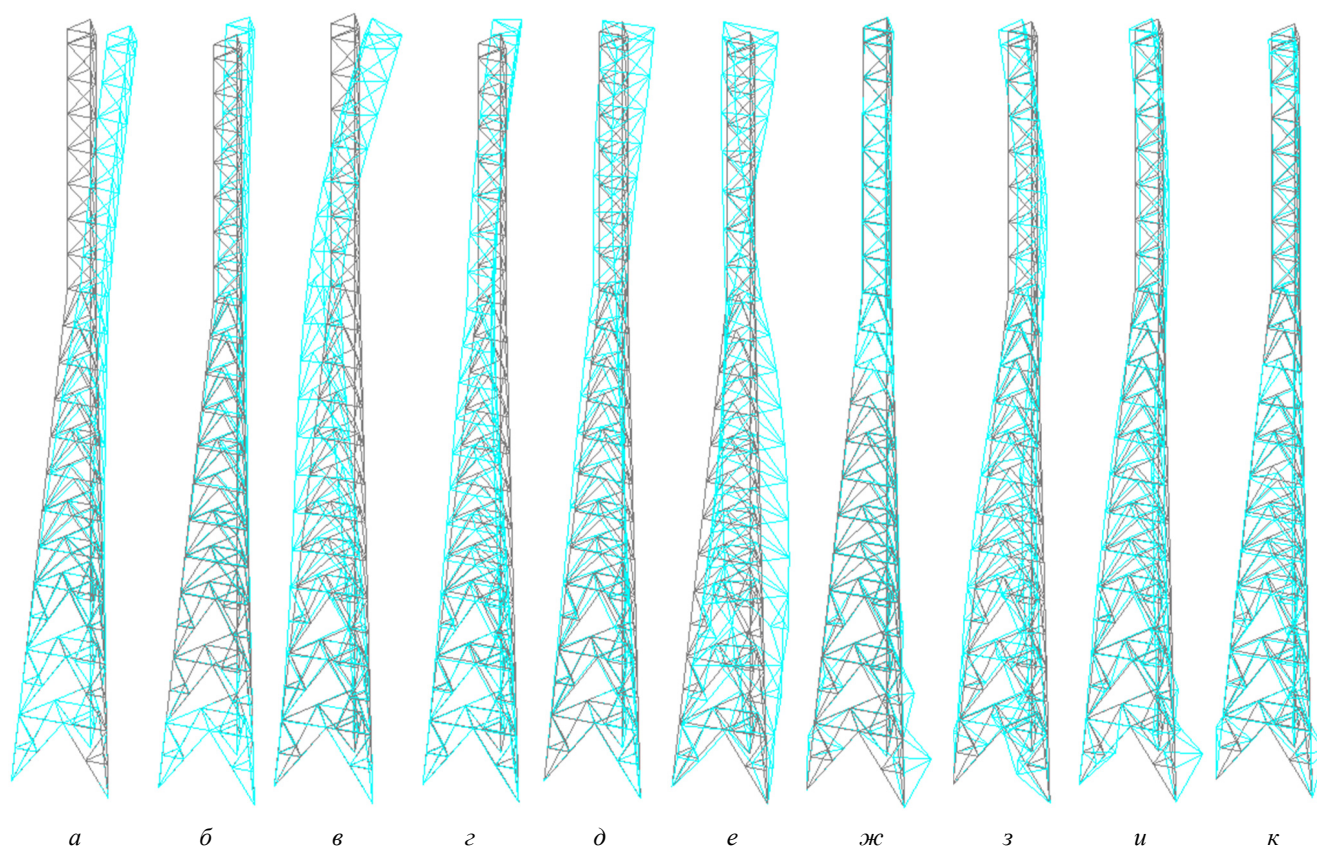


Рис. 7. Первые 10 форм собственных колебаний башни Б1 с оборудованием:

а — первая изгибная форма в направлении минимальной жесткости; *б* — вторая изгибная форма в ортогональной плоскости; *в–е* — третья–шестая изгибно-крутильные формы; *ж–к* — седьмая–десятая локальные формы колебаний

Источник: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 7. First ten natural vibration modes of Tower T1 with equipment:

a — first bending mode in the direction of minimum stiffness; *b* — second bending mode in the orthogonal plane; *v–e* — the third – the sixth bending–torsional modes; *ж–к* — the seventh – the tenth local vibration modes

Source: made by Yu.D. Markina.

Таблица 4. Периоды собственных колебаний башен
Table 4. Natural vibration periods of the towers

Форма колебаний / Mode shape	Период собственных колебаний, с / Natural vibration period, s			
	Б1 с оборудованием / T1 with equipment	Б1 без оборудования / T1 without equipment	Б2/Г2	Б3/Г3
1	1,031	0,862	1,389	1,150
2	1,007	0,844	1,370	1,125
3	0,321	0,282	0,358	0,346
4	0,304	0,268	0,339	0,323
5	0,276	0,239	0,324	0,304
6	0,166	0,154	0,163	0,187
7	0,141	0,140	0,153	0,160
8	0,139	0,137	0,153	0,156
9	0,134	0,131	0,123	0,144
10	0,132	0,129	0,120	0,141

Источники: выполнено Ю.Д. Маркиной / Source: made by Yu.D. Markina.

Все три башни обладают выраженными торсионно-изгибными формами в диапазоне 3–6, обусловленными тем, что вертикальный пояс создает различную жесткость в плоскостях изгиба и снижает крутильную жесткость. Формы 7–10 являются локальными, соответствуют колебаниям отдельных панелей решетки и верхнего блока и практически не зависят от оборудования. На этих частотах динамическая работа определяется локальными параметрами решетки.

В целом результаты показывают, что для трехгранных башен с одним вертикальным поясом конструктивная схема является доминирующим фактором, определяющим пространственную жесткость, систему перемещений и динамические характеристики. Климатические условия и различное распределение оборудования усиливают, но не изменяют общие закономерности поведения. Все три объекта имеют типичную для асимметричных трехгранных конструкций комбинацию повышенной гибкости в направлении вертикальной грани, наличия выраженного торсионного компонента и локальных эффектов, связанных с реальным расположением вспомогательных элементов.

4. Заключение

В результате исследования трех трехгранных АМС с асимметричной нижней частью, выполненной в форме трехгранной усеченной пирамиды с одним вертикальным поясом, получены следующие научные результаты.

1. Выявлена устойчивая закономерность пространственной работы конструкций: максимальные горизонтальные перемещения во всех случаях формируются при ветровом воздействии в вертикальную грань (Г1), что подтверждает доминирующее влияние геометрической асимметрии нижнего блока.

2. Установлена роль наклонных поясов, создающих распорную работу и уменьшающих деформации при ветре в направлениях Г2 и Г3 на 9–18 % к верхним отметкам. Вертикальный пояс распор не формирует, что обуславливает направление минимальной жесткости и наиболее неблагоприятную деформационную форму.

3. Показано, что решетка обладает значительным запасом несущей способности, тогда как предельные состояния формируются в поясах и анкерах. Наибольшие усилия во всех башнях концентрируются в нижних участках наклонных поясов (0–6 м).

4. Установлено влияние эксплуатационной асимметрии (оборудование, лестницы, площадки, кабельные лотки) на деформированную форму. Она усиливает S-образный характер изгиба, изменяет распределение жесткости и препятствует достижению полной симметрии даже в варианте без оборудования.

5. Определено влияние оборудования на динамику: добавленная масса снижает частоты первых изгибных форм на 16–20 %, а торсионно-изгибных — на 10–15 %, практически не затрагивая локальные формы (7–10).

6. Показано различие динамической гибкости между башнями Б1, Б2 и Б3, обусловленное сочетанием массы металлоконструкций, ветровой нагрузки и массы оборудования.

7. Идентифицирована выраженная торсионно-изгибная составляющая в формах 3–6, являющаяся следствием асимметрии жесткостной схемы и присутствия одного вертикального пояса. Этот эффект — характерная особенность данного типа трехгранных АМС.

8. Сформированы количественные показатели деформационной и динамической чувствительности к асимметрии, что создает основу для дальнейшего сравнения с эквивалентной симметричной моделью.

References / Список литературы

1. Tsavdaridis K.D., Nicolaou A., Mistry A.D., Efthymiou E. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. *Structures*. 2020;27:2379–2399. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.060> EDN: ПАПЛФ
2. Kefal A., Sohoul A., Oterkus E., Yildiz M., Suleman A. Topology optimization of cracked structures using peridynamics. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019;31:1645–1666. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00804-w> EDN: HMDRWP
3. He L., Gilbert M., Johnson T., Pritchard T. Conceptual design of AM components using layout and geometry optimization. *Computers and Mathematics with Applications*. 2018;76:2166–2185. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.07.034>
4. Zhang D, Song X, Deng H, Hu X, Ma X. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under skew winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021; 214:104678. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104678> EDN: XOPYTX
5. Zhang W., Xiao Y., Li C., Zheng Q., Tang Y. Wind load investigation of self-supported lattice transmission tower based on wind tunnel tests. *Engineering Structures*. 2022;252:113575. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113575> EDN: LJNXDT
6. Wu P., Chen G., Feng R., He F. Research on wind load characteristics on the surface of a towering precast television tower with a grid structure based on Large Eddy Simulation. *Buildings*. 2022;12(9):428. <https://doi.org/10.3390/buildings12091428>
7. Khazaali M., Ma L., Rokneddin K., Mazzotti M., Bocchini P. A robust protocol to compute wind load coefficients of telecommunication towers and antennas using numerical simulation for risk and resilience assessment. *Resilient Cities and Structures*. 2024;3(1):66–83. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2024.02.001> EDN: LYXCFY
8. Moradi A., Salajegheh E., Tavakol M.M., Heidari A. Numerical simulation of turbulent airflow around a tall telecommunication tower model. *Advances in Aerodynamics*. 2024;6:26. <https://doi.org/10.1186/s42774-024-00185-1> EDN: YRHJOR
9. Johnson R.M., Smith T.A. Wind Load Analysis of Communication Towers: A Comparative Study. *Journal of Structural Engineering*. 2020;146(3):04019120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002532)
10. Brown S.E., Taylor J.P. Structural Assessment of Cellular Towers Subjected to Wind Loads. *International Journal of Engineering Research*. 2021;9(4):256-263. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS040265>
11. Vlădulescu F., Constantinescu D.M. Tower structure optimization through finite element analyses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;997:012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012020> EDN: ACCPJO
12. Kenéz Á., Joó A.L. Performance-based wind engineering assessment of a telecommunication mast utilizing Bayesian extreme wind velocity model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2024;38:727–749. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02596-w> EDN: QXLUJQ
13. Li H.N., Liu H.J., Fu X., Zhao K., Yang X.L., Wen Z.F. Failure criteria and wind-induced vibration analysis for an offshore platform jacking system. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2021;21(5):2150105. <https://doi.org/10.1142/S0219455421501054> EDN: GQYSUL
14. He B., Zhao M., Feng W., Xiu Y., Wang Y., Feng L., Qin Y., Wang C. A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds. *Advances in Engineering Software*. 2019;127:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.10.004>
15. Fernández Lorenzo I., Clavelo Elena B., Martín Rodríguez P., Elena Parnás V.B. Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020;197:104078. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104078> EDN: MEZHDB
16. Kassem M.M., Yang M., Liu S., Liu J., Gao G., Yang Z. Quantification of the seismic behavior of a steel transmission tower subjected to single and repeated seismic excitations using vulnerability function and collapse margin ratio. *Applied Sciences*. 2022;12(4):1984. <https://doi.org/10.3390/app12041984> EDN: UNGRWA

17. Tian L., Yang M., Liu S., Liu J., Gao G., Yang Z. Collapse failure analysis and fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to multidimensional ground motion of different input directions. *Structures*. 2023;48:1018–1028. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.042> EDN: NAVTRP

18. Fu Z., Tian L., Liu J. Seismic response and collapse analysis of a transmission tower-line system considering uncertainty factors. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022;189:107094. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107094> EDN: IHGQUO

19. Clavelo B., Moes K., Martin P., Elena V., Tubino F. Experimental Evaluation of the Aerodynamic Coefficients of an Antenna Mast by Wind Tunnel Tests. *Journal of Structural Engineering*. 2022;151:11. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-14810> EDN: MYADQF

20. Belash T.A., Safin R.R. Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics. *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2024;(2):18–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.37538/2224-9494> 2024-2(41)-18-28 EDN: CQQMAP

Белаш Т.А., Сафин Р.Р. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них // Вестник НИЦ Строительство. 2024. № 2 (41). С. 18–28. <https://doi.org/10.37538/2224-9494> 2024-2(41)-18-28 EDN: CQQMAP

21. Markina Yu.D. Influence of technological equipment placement on the results of numerical simulation of a cellular communication tower. *Omskiy Nauchnyy Vestnik*. 2025;(4):26–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-26-34> EDN: UGRPYB

Маркина Ю.Д. Влияние расположения технологического оборудования на результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи // Омский научный вестник. 2025. № 4(196). С. 26–34. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-26-34>

22. Rasool A.M., Qureshi M.U., Ahmad M. A Comparative study on the calculation of wind load and analysis of communication tower as per TIA-222-G and TIA-222-H Standards. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021;25:646–653. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0662-5>

23. Williams T. Assessing and moving on from the dominant project management discourse in the light of project overruns. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2005;52(4):497–508. <https://doi.org/10.1109/TEM.2005.856572>

24. Markina Yu.D. Design wind directions in structural assessment of triangular antenna-mast structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(4):334–345. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345> EDN: CIVXMF

Маркина Ю.Д. Расчетные направления ветра при экспертизе несущей способности трехгранных антенно-мачтовых сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 4. С. 334–345. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345> EDN: CIVXMF

25. Langlois S., Prud'homme S., Légeron F., Pourshargh F. Review of advanced modelling methods for lattice steel towers. *CIGRE-IEC Colloquium on Overhead Lines*. May 9–11, 2016, Montréal, QC, Canada, 2016:1–8. Available from: https://www.researchgate.net/publication/304321959_Review_of_advanced_modelling_methods_for_lattice_steel_towers_Montreal_QC_Canada (accessed: 17.09.2025).