

DOI: 10.22363/1815-5235-2026-22-3-267-282

EDN: LJBKAD

Научная статья / Research article

Влияние степени детализации расчетной модели на напряженно-деформированное состояние антенно-мачтового сооружения

Ю.Д. Маркина^{ID}

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

✉ poluektoff@bk.ru

Поступила в редакцию: 2 мая 2026 г.

Доработана: 4 июня 2026 г.

Принята к публикации: 5 июня 2026 г.

Аннотация. Антенно-мачтовые сооружения широко применяются для размещения телекоммуникационного оборудования. При проектировании таких сооружений существенное влияние на результаты расчета может оказывать состав расчетной модели и способ учета конструктивных элементов, в частности рабочих площадок. Особую сложность представляет анализ конструкций с выраженной геометрической асимметрией. Цель исследования — изучение влияния способа учета рабочих площадок на напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики антенно-мачтового сооружения, а также оценка области применимости упрощенной расчетной модели. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов в программном комплексе SCAD Office. Рассмотрены три расчетные модели мачты, различающиеся способом учета рабочих площадок: с явным моделированием площадок, с учетом нагрузок от площадок и без учета площадок. Дополнительно проанализированы башенные сооружения со сходным асимметричным расположением площадок. Выполнен сравнительный анализ распределения продольных усилий и изгибающих моментов по высоте мачты, горизонтальных перемещений, а также частот и форм собственных колебаний конструкции. Показано, что способ моделирования площадок в наименьшей степени влияет на продольные усилия у основания и нагрузки на фундамент, однако оказывает существенное влияние на изгибающие моменты и перемещения верхней части сооружения, где расположены площадки. Для отдельных параметров расхождение между моделями превышает 20 %. Полученные результаты подтверждают необходимость корректного учета асимметрично расположенных площадок при расчете антенно-мачтовых сооружений.

Ключевые слова: антенно-мачтовое сооружение, численное моделирование, метод конечных элементов, динамические характеристики, ветровая нагрузка, асимметрия конструкции

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в публикуемую статью.

Благодарности. Автор выражает благодарность директору общества с ограниченной ответственностью «СВЯЗЬ-СТРОЙРЕГИОН» Петухову Сергею Александровичу (г. Ижевск, Российская Федерация) за предоставление технической документации по объекту исследования.

Для цитирования: Маркина Ю.Д. Влияние степени детализации расчетной модели на напряженно-деформированное состояние антенно-мачтового сооружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2026. Т. 22. № 3. С. 267–282. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-3-267-282> EDN: LJBKAD

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 the Level of Detail of the Computational Model on the Stress State of a Guyed Mast

Yulia D. Markina 

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, *Nizhny Novgorod, Russian Federation*

✉ poluektoff@bk.ru

Received: April 2, 2026

Revised: June 4, 2026

Accepted: June 5, 2026

Abstract. Guyed masts are widely used for telecommunication equipment installation. In the structural analysis of such structures, the composition of the computational model and the method of incorporating structural elements, including service platforms, may significantly influence the calculation results. The analysis becomes more complicated for masts with pronounced geometric asymmetry caused by the one-sided arrangement of service platforms. The aim of this study is to investigate the influence of different methods of modeling service platforms on the stress state and dynamic characteristics of a guyed mast. Numerical analysis was performed using the finite element method in the SCAD Office software. Three computational models were considered: with explicit modeling of platforms, with equivalent loads from platforms, and without considering the platforms. In addition, mast structures with similar asymmetrical arrangement of the platforms are analyzed. A comparative analysis of axial forces, bending moments along the mast height, horizontal displacements, and natural vibration frequencies was carried out. The results show that the method of platform modeling has a minor effect on axial forces, but significantly influences bending moments and horizontal displacements of the upper part of the mast, where the platforms are located. For some parameters, the difference between models reaches 20–22%. The results demonstrate the importance of proper consideration of asymmetrically arranged platforms in the structural analysis of guyed masts.

Keywords: guyed mast, numerical modeling, finite element method, dynamic characteristics, wind load, structural asymmetry

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

Data availability. All data obtained during this study are included in the article being published.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Acknowledgements. The author expresses gratitude to Sergey A. Petukhov, Director of OOO “SVYAZSTROYREGION” (company in Izhevsk, Russian Federation), for providing the technical documentation for the object of the study.

For citation: Markina YuD. Influence of the level of detail of the computational model on the stress state of a guyed mast. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(3):267–282. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-3-267-282> EDN: LJBKAD

1. Введение

Методы численного анализа позволяют выполнять расчет сложных инженерных сооружений с высокой степенью детализации и учитывать широкий спектр факторов, влияющих на их работу [1; 2]. Вычислительная техника и программные комплексы конечно-элементного анализа существенно расширяют возможности моделирования пространственных конструкций. Однако получение достоверных результатов численного анализа напрямую зависит от соответствия принятой расчетной схемы реальной работе сооружения [3; 4].

Одним из наиболее сложных этапов подготовки исходных данных для численного анализа является выбор расчетной схемы и определение состава элементов, включаемых в расчетную модель. Программные комплексы позволяют создавать высокодетализированные модели конструкций, однако чрезмерная детализация приводит к увеличению вычислительных затрат, усложняет интерпретацию результатов и может увеличивать погрешности, связанные с неопределенностью исходных параметров [5; 6].

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

В инженерной практике отсутствуют универсальные рекомендации относительно степени детализации расчетных моделей и способов учета отдельных конструктивных элементов. Задача инженера заключается не в создании максимально подробной модели, а в рациональном выборе факторов, оказывающих существенное влияние на работу конструкции, с исключением второстепенных элементов, не оказывающих значимого влияния на результаты расчета [7; 8]. Особенно актуальным выбор состава расчетной схемы является при расчете уникальных и высотных сооружений [9; 10], к которым относятся антенно-мачтовые сооружения. Такие конструкции характеризуются значительной гибкостью, высокой чувствительностью к ветровым воздействиям и сложным пространственным взаимодействием элементов. Особенности компоновки оборудования и вспомогательных конструкций могут существенно влиять на распределение нагрузок [11; 12], жесткость системы и динамические характеристики сооружения [13–15].

Одним из неоднозначных аспектов формирования расчетных моделей антенно-мачтовых сооружений является способ учета в расчетной схеме вспомогательных конструктивных элементов: лестниц, площадок обслуживания и технологического оборудования. Чаще всего данные элементы заменяются эквивалентными нагрузками, приложенными к основной несущей системе [16–18], что позволяет упростить расчетную модель и снизить трудоемкость численного анализа. Однако пространственное расположение вспомогательных конструкций может оказывать существенное влияние на распределение масс и жесткости системы, аэродинамические характеристики и динамическое поведение сооружения [19–21]. В наибольшей степени это влияние проявляется в случаях расположения элементов асимметрично относительно оси сооружения и формирует выраженную геометрическую асимметрию конструкции.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных численному анализу башенных и мачтовых сооружений, влияние степени детализации расчетной модели, то есть различий между явным моделированием вспомогательных конструкций, их заменой эквивалентными нагрузками и исключением из расчетной схемы, изучено в меньшей степени. В частности, в литературе практически отсутствуют исследования, направленные на количественную оценку влияния различных способов учета рабочих площадок на силовые, деформационные и динамические характеристики антенно-мачтовых сооружений.

Цель исследования — количественная оценка влияния различных способов учета асимметрично расположенных рабочих площадок на силовые, деформационные и динамические характеристики антенно-мачтового сооружения, а также определение области допустимого применения упрощенной расчетной модели с эквивалентными нагрузками.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- разработать несколько расчетных моделей антенно-мачтового сооружения с различным способом учета рабочих площадок;
- выполнить нелинейный расчет пространственной системы методом конечных элементов;
- провести сравнительный анализ распределения усилий в стволе мачты;
- оценить влияние способа моделирования площадок на горизонтальные перемещения конструкции;
- исследовать изменение динамических характеристик сооружения, включая частоты и формы собственных колебаний;
- проанализировать влияние расчетной схемы на нагрузки, передаваемые на фундамент.

2. Методы

В качестве основного объекта исследования принята металлическая мачта высотой 86,625 м, расположенная в Республике Коми Российской Федерации (рис. 1). Ствол мачты представляет собой оболочку диаметром 1220 мм толщиной 12 мм с длиной секций 11,0 м по осям стыков для промежуточных и оттяжечных секций и длиной 4 м для верхней секции. Стыковка секций между собой,

крепление лацменов и других элементов выполнены на высокопрочных болтовых соединениях. Внутри ствола мачты проходит по всей высоте лестница-стремянка с площадками для отдыха. Опира-ние ствола мачты на фундамент выполнено шарнирным методом. Мачта по высоте раскреплена двумя ярусами оттяжек, расположенными по четырем направлениям в плане. Оттяжки, выполненные из оцинкованного стального каната с металлическим сердечником, крепятся к стволу и анкерным фундаментам с помощью механических деталей. Оболочка ствола выполнена из стали 17Г1С.



Рис. 1. Объект исследования:

a — общий вид; *б* — опорный узел и площадки

И с т о ч н и к: выполнено А.А. Маркиным.

Figure 1. Object of research:

a — general view of the mast; *б* — service platforms

S o u r c e: made by A.A. Markin.

В 2003 г. была произведена реконструкция мачты за счет наращивания ее ствола с помощью двух секций длиной 2,5 м в виде четырехгранных решетчатых призм с базой 1,1 м, соединенных между собой при помощи фланцев на болтах. Внутри дополнительных секций для обслуживания антенн предусмотрена лестница-стремянка. На верхней секции было установлено эксплуатационное грузоподъемное устройство $Q = 0,5$ т. Существующие и проектируемые кабели от антенно-фидерных устройств до аппаратной идут внутри ствола мачты по существующим планкам. Первый и второй ярусы оттяжек расположены на отметках 33,385 и 66,385 м, рабочие площадки — на отметках 55,385 и 77,385 м.

Рабочие площадки формируют выраженную геометрическую асимметрию конструкции, что при их некорректном учете может приводить к погрешностям при определении усилий и перемещений. Нагрузки от площадок определялись с использованием алгоритма расчета нагрузок от рабочих площадок антенно-мачтовых сооружений [22]. Расчетная нагрузка от собственного веса каждой площадки составила 1062,6 кг. Ветровая нагрузка от элементов площадки на отметке +55,385 м составила 266,98 кг, а для площадки на отметке +77,385 м — 295,12 кг.

Численное исследование выполнено в программном комплексе SCAD Office 21, лицензия № 17203, разработчик SCAD Soft. SCAD Office представляет собой программный комплекс конечно-элементного анализа строительных конструкций, предназначенный для расчета сооружений на статические и динамические воздействия. Программный комплекс содержит библиотеку стержневых, пластинчатых, объемных и специальных конечных элементов, а также модули расчета усилий, перемещений, устойчивости и динамических характеристик конструкций. Англоязычное описание программы приведено на официальном сайте разработчика¹. Расчетная схема мачты сформирована как пространственная конечно-элементная модель. Ствол мачты, элементы рабочих площадок и решетчатой надстройки задавались стержневыми конечными элементами типа 5. Тип элемента 5 «Пространственный стержень» обладает шестью степенями свободы в узле (UX, UY, UZ, RX, RY, RZ), основан на аппроксимации изгиба по модели Эйлера — Бернулли с учетом сдвига по теории Тимошенко и обеспечивает корректное представление изгибных, продольных и крутильных деформаций тонкостенных элементов. 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 антенно-мачтовых сооружений [23]. Стержневые элементы также соответствуют нормативной методике расчета антенно-мачтовых сооружений². Примыкание площадок и надстройки к стволу моделировались с использованием абсолютно твердых тел, связывающих перемещения ведомых узлов с перемещениями ведущего узла по законам кинематики абсолютно твердого тела, что позволяет передавать усилия от площадок в основную несущую систему с учетом эксцентриситета соединения и без искусственной податливости в зоне примыкания. Оттяжки задавались специальными конечными элементами вантового типа 308 с учетом геометрической нелинейности их работы и начального натяжения, принятого в соответствии с технической документацией по объекту. Расчетной моделью элемента типа 308 является гибкая нить с малой стрелой провисания, работающая только на растяжение и учитывающая начальное натяжение, собственный вес, изменение длины хорды и геометрически нелинейный характер работы каната. При выполнении динамического анализа работа вант учитывается в линеаризованной постановке относительно предварительно найденного равновесного состояния конструкции. Опираение ствола мачты задавалось запретом линейных перемещений опорного узла по направлениям X, Y и Z при свободных угловых перемещениях. Анкерные узлы оттяжек моделировались как неподвижные точки крепления: в них запрещались линейные перемещения по направлениям X, Y и Z. Передача усилий от оттяжек осуществлялась через осевое натяжение вантового элемента типа 308. Угловые степени свободы в анкерных узлах не использовались для передачи усилий от вантовых элементов, поскольку элемент типа 308 передает в расчетную схему только осевое усилие растяжения. Расчет выполнялся шагово-итерационным методом в геометрически нелинейной постановке, что обусловлено наличием вантовых элементов и необходимостью учета изменения их жесткости в процессе нагружения. Нелинейные загрузки включали собственный вес конструкции и ветровые воздействия в различных направлениях относительно системы оттяжек. Нагрузка прикладывалась поэтапно; на каждом шаге уточнялось равновесное состояние конструкции и пересчитывалась жесткость вантовых элементов с учетом достигнутого уровня натяжения, что позволило учесть геометрически нелинейную работу оттяжек при определении усилий, перемещений и динамических характеристик мачты. Для основных нелинейных загрузок использовалось

¹ Интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций. URL: scad-soft.ru (дата обращения: 28.12.2025).

десять шагов роста нагрузки и не более десяти итерационных уточнений на шаг. По протоколу расчета требуемая точность достигалась не более чем за семь итераций, что свидетельствует о сходимости нелинейного решения. Нагрузки и расчетные сочетания назначались по требованиям Свода правил Российской Федерации СП 20.13330.2016², а расчет стальных элементов выполнялся с учетом требований Свода правил Российской Федерации СП 16.13330.2017². Корректность результатов подтверждается сопоставимостью с результатами более ранних поверочных расчетов несущей способности мачты, выполненных в рамках экспертизы. Наиболее неблагоприятным для ствола является ветровое нагружение в плоскости, перпендикулярной расположению рабочих площадок.

Для оценки влияния способа учета площадок были сформированы три расчетные модели, различающиеся степенью детализации конструкции:

Модель 1: с моделированием рабочих площадок в расчетной схеме (рис. 2);

Модель 2: без моделирования площадок, но с учетом нагрузок от их собственного веса и ветрового воздействия;

Модель 3: без учета площадок.

Для повышения воспроизводимости расчета основные параметры конечно-элементных моделей приведены в табл. 1.

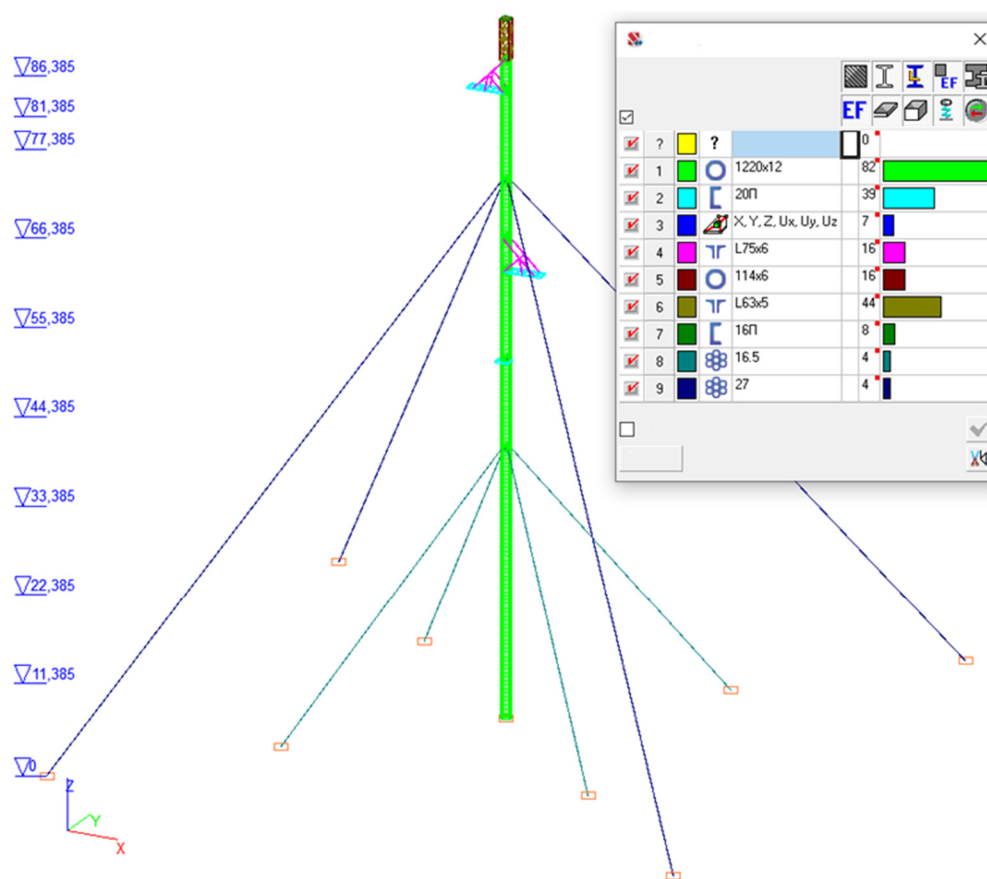


Рис. 2. Визуализация расчетной схемы мачты с обозначением жесткостей

Источник: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 2. Visualization of the computational model of the mast with the designation of stiffness values

Source: made by Yu.D. Markina.

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва : Стандартинформ, 2018. 154 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 28.12.2025); СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. Москва, 2017. 286 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (дата обращения: 28.12.2025).

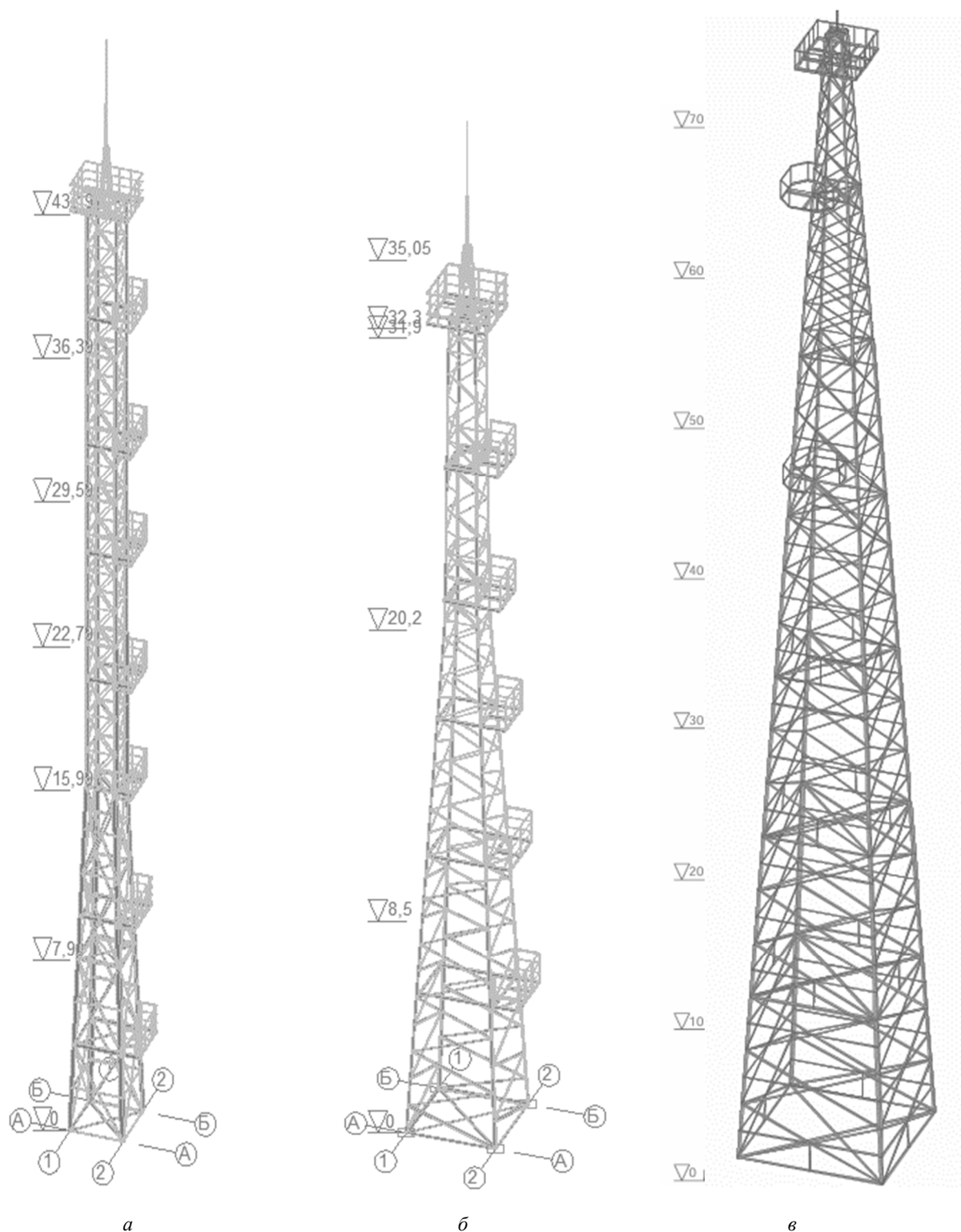


Рис. 3. Визуализация расчетной схемы башен:

a — прожекторная башня высотой 45,93 м; *б* — прожекторная башня высотой 35,05 м;
в — башня сотовой связи высотой 70 м

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

Figure 3. Visualization of the computational model of towers:

a — searchlight tower with a height of 45.93 m; *б* — searchlight tower with a height of 35.05 m;
в — cellular tower with a height of 70 m

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

Таблица 1. Основные параметры конечно-элементных моделей
 Table 1. Basic parameters of finite element models

Параметр / Parameter	Модель 1 / Model 1	Модель 2 / Model 2	Модель 3 / Model 3
Число узлов / Number of nodes	167	131	131
Число конечных элементов / Number of finite elements	220	165	165
Способ учета рабочих площадок / Method of platform modeling	Явное моделирование площадок / Explicit platform modeling	Эквивалентные нагрузки от площадок / Equivalent platform loads	Без учета площадок / Platforms excluded
Тип элементов ствола мачты / Finite element type for the mast shaft	КЭ 5 / FE 5		
Тип элементов рабочих площадок / Finite element type for service platforms	КЭ 5 / FE 5	Не моделируются / Not modeled	Не моделируются / Not modeled
Тип элементов решетчатой надстройки / Finite element type for lattice superstructure	КЭ 5 / FE 5		
Тип элементов оттяжек / Finite element type for guys	КЭ 308 / FE 308		
Способ передачи нагрузок от площадок / Method of platform load transfer	Через элементы площадок и абсолютно твердые тела / Through platform elements and rigid bodies	В виде эквивалентных нагрузок в узлы ствола / As equivalent loads applied to mast nodes	Не учитываются / Not included

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

Сравнение результатов проводилось по распределению усилий в стволе мачты, горизонтальным перемещениям конструкции, частотам собственных колебаний и нагрузкам на фундамент.

Для оценки возможности обобщения результатов дополнительно рассмотрены металлические прожекторные башни высотой 45,93 и 35,05 м, расположенные в Ямало-Ненецком автономном округе, металлическая башня сотовой связи высотой 70 м, расположенная в Нижегородской области (рис. 3). Анализ этих объектов показал аналогичный характер расчетной проблемы: асимметрично расположенные площадки формируют локальный эксцентриситет массы и ветровой нагрузки, поэтому их исключение из расчетной схемы может исказить результаты анализа. Основным объектом рассматривается в статье как детальный расчетный пример, а дополнительные сооружения подтверждают, что исследуемая ситуация не является особенностью одного антенно-мачтового сооружения.

3. Результаты и обсуждение

Анализ распределения усилий (рис. 4) показал, что уровни крепления оттяжек определяют основные переломы эпюр продольных сил и изгибающих моментов. Влияние площадок обслуживания проявляется преимущественно в верхней части сооружения.

Распределение продольной силы по высоте для всех трех расчетных моделей имеет одинаковый общий характер (рис. 4, а): максимальное сжатие наблюдается у основания мачты, после чего продольное усилие монотонно уменьшается к вершине. На уровнях крепления оттяжек фиксируются выраженные скачки продольной силы. Максимальные значения продольных сил в стволе мачты для моделей 1 и 2 практически совпадают. Относительное отличие между результатами моделей 1 и 3 возрастает по высоте ствола: от 3 % в основании до 24 % в верхней части сооружения. Однако абсолютная величина продольных усилий в этой зоне существенно меньше, чем у основания мачты, вследствие чего влияние различий между моделями на оценку несущей способности конструкции оказывается ограниченным.

На уровне крепления оттяжек наблюдается перелом эпюры момента (рис. 4, б) и смена его знака, что отражает изменение характера работы ствола мачты. В верхней половине сооружения, где

расположены рабочие площадки, различия между моделями становятся значительно более выраженными. Вблизи нижней площадки на отметке 55,385 м расхождение между моделью 1 и моделью 3 достигает 15–20 %. Максимальное отличие наблюдается в зоне второго яруса оттяжек, где изгибающий момент для модели с площадками составляет около 29,8 т·м, а для модели без площадок составляет около 23,4 т·м, то есть отличается более чем на 20 %. Таким образом, исключение площадок из расчетной схемы приводит к занижению изгибающих моментов в верхней части ствола до 22 % (в том числе максимальных значений), что может существенно повлиять на оценку прочности конструкции. Асимметрично расположенные площадки изменяют распределение массы и ветровой нагрузки относительно оси сооружения, вызывая дополнительный изгиб ствола мачты. Модель 2 также не дает полного совпадения результатов с моделью 1. Максимальная погрешность 11 % возникает в зонах первого и второго ярусов оттяжек.

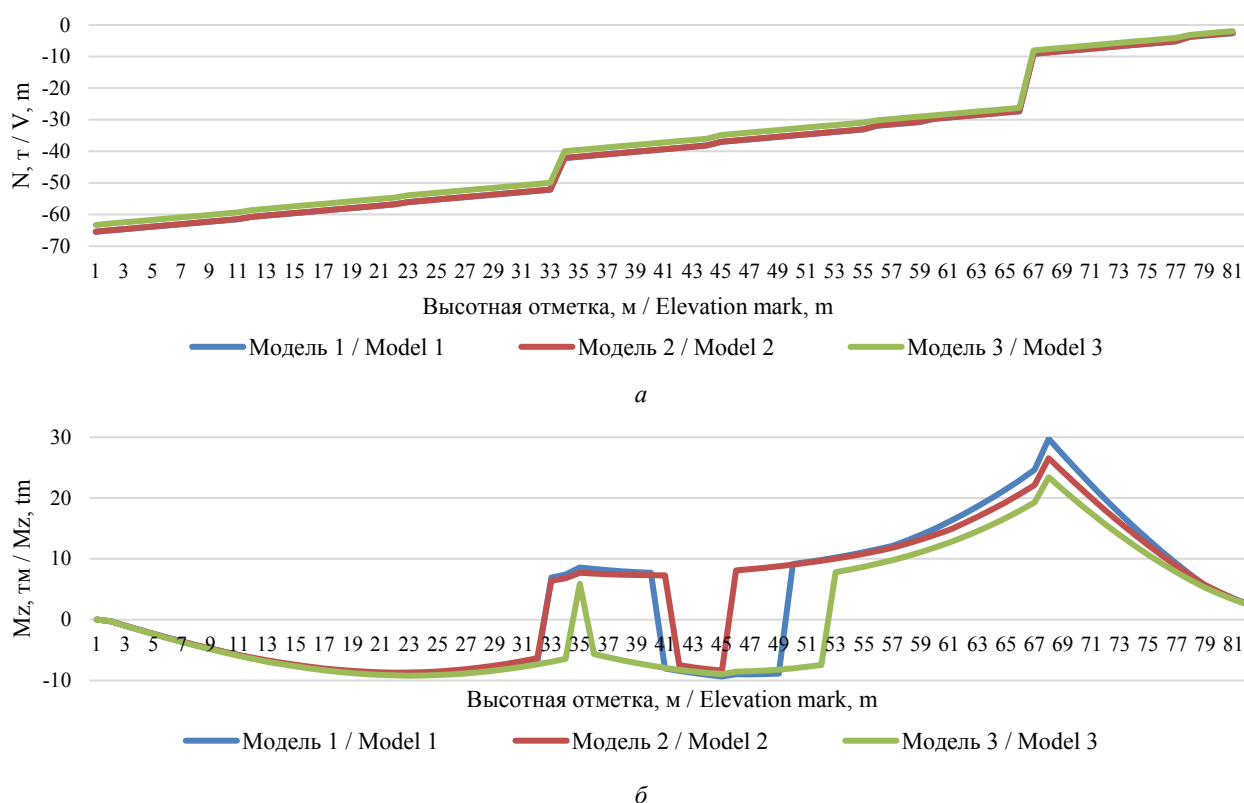


Рис. 4. Распределение усилий в стволе мачты по высоте:

a — продольная сила; *б* — изгибающий момент

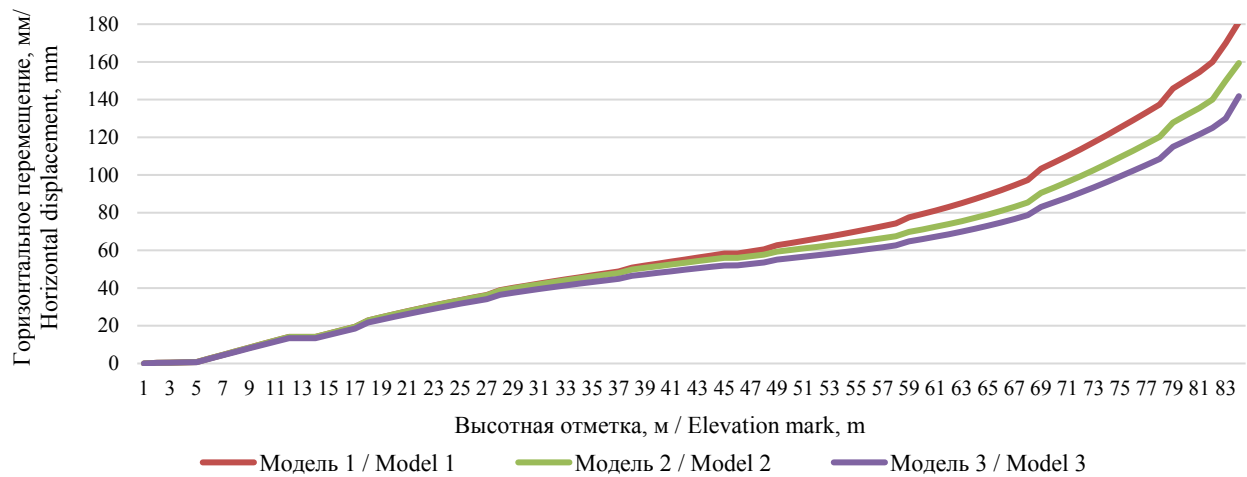
Источник: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 4. Distribution of internal forces along the mast height:

a — axial force; *б* — bending moment

Source: made by Yu.D. Markina.

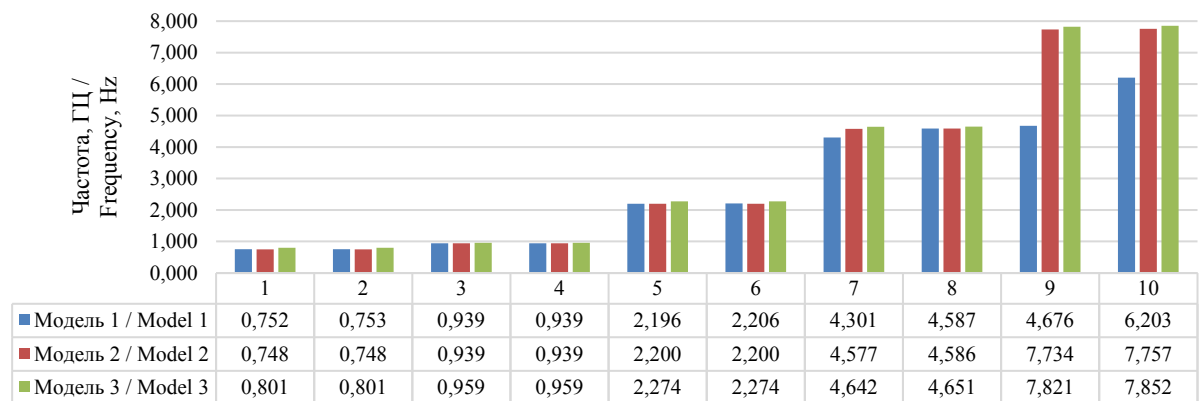
Анализ горизонтальных перемещений (рис. 5) показал, что учет площадок оказывает заметное влияние на общую деформативность сооружения. Перемещения монотонно возрастают по высоте мачты и достигают максимальных значений в ее верхней части. Максимальное горизонтальное перемещение вершины составляет 181 мм для модели 1, 159 мм для модели 2, 142 мм для модели 3. Разница между моделями 1 и 2 достигает 12 %, между моделями 1 и 3 достигает 22 %. Явное моделирование площадок увеличивает гибкость системы и приводит к росту горизонтальных перемещений мачты. Учитывая, что высотные антенно-мачтовые сооружения характеризуются повышенной чувствительностью к горизонтальным деформациям, такое расхождение может существенно влиять на оценку эксплуатационной надежности сооружения.

**Рис. 5.** Горизонтальные перемещения мачты по высоте

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

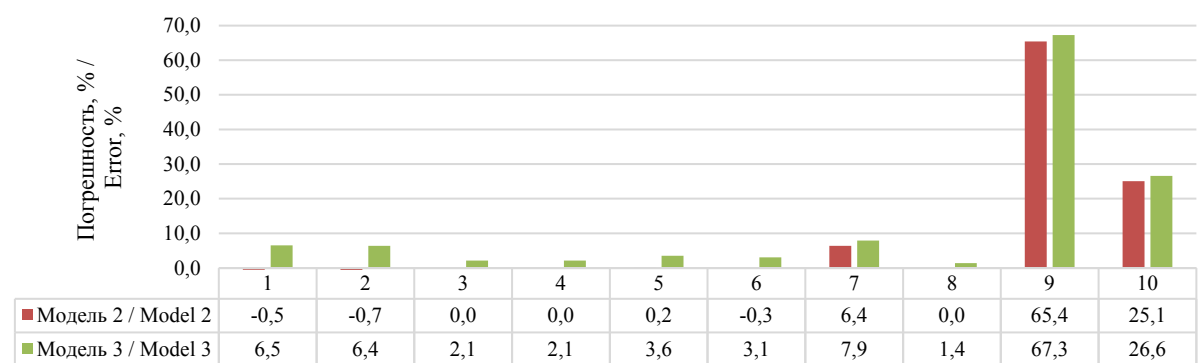
Figure 5. Horizontal displacements along the mast height

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



Формы колебаний / Mode shape

a



Формы колебаний / Mode shape

б

Рис. 6. Сравнение частот собственных колебаний расчетных моделей:

a — значения частот; б — относительная погрешность

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

Figure 6. Comparison of natural frequencies of the computational models:

a — frequency values; б — relative error

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

В результате анализа частот собственных колебаний (рис. 6) выявлено, что влияние способа учета площадок на первые формы колебаний относительно невелико. Различие между моделями 1 и 2 не доходит до 1%, различие между моделями 1 и 3 — до 7 %. Более высокие формы колебаний демонстрируют существенно большую чувствительность к способу моделирования площадок. Для девятой формы локальных колебаний (рис. 7) разница частот между моделями достигает 65–67 %, что объясняется перераспределением масс и жесткости в зоне размещения площадок. Наличие дополнительных масс, вынесенных от оси мачты, приводит к изменению инерционных характеристик системы и повышенной чувствительности высших форм колебаний к способу моделирования конструктивных элементов.

Анализ первых десяти форм собственных колебаний (рис. 7) позволил выявить, что динамическое поведение сооружения определяется преимущественно изгибными формами колебаний ствола мачты. Первые две формы соответствуют глобальным изгибным колебаниям конструкции, а максимальные перемещения наблюдаются в верхней части мачты. Формы 3–4 характеризуются появлением точки перегиба в средней части ствола, формы 5–6 связаны с локальными колебаниями верхних участков конструкции и оборудования. Формы 7–10 имеют комбинированный характер деформаций, включая локальные колебания площадок, наблюдается частичное смешение изгибных и крутильных составляющих колебаний, что обусловлено асимметричным расположением площадок относительно оси мачты.

Анализ реакций в основании мачты и анкерных узлах оттяжек (табл. 2) показал, что влияние способа учета площадок на силовые факторы в опорных узлах незначительно. Различие вертикальных и горизонтальных реакций в основании не превышает 6 %.

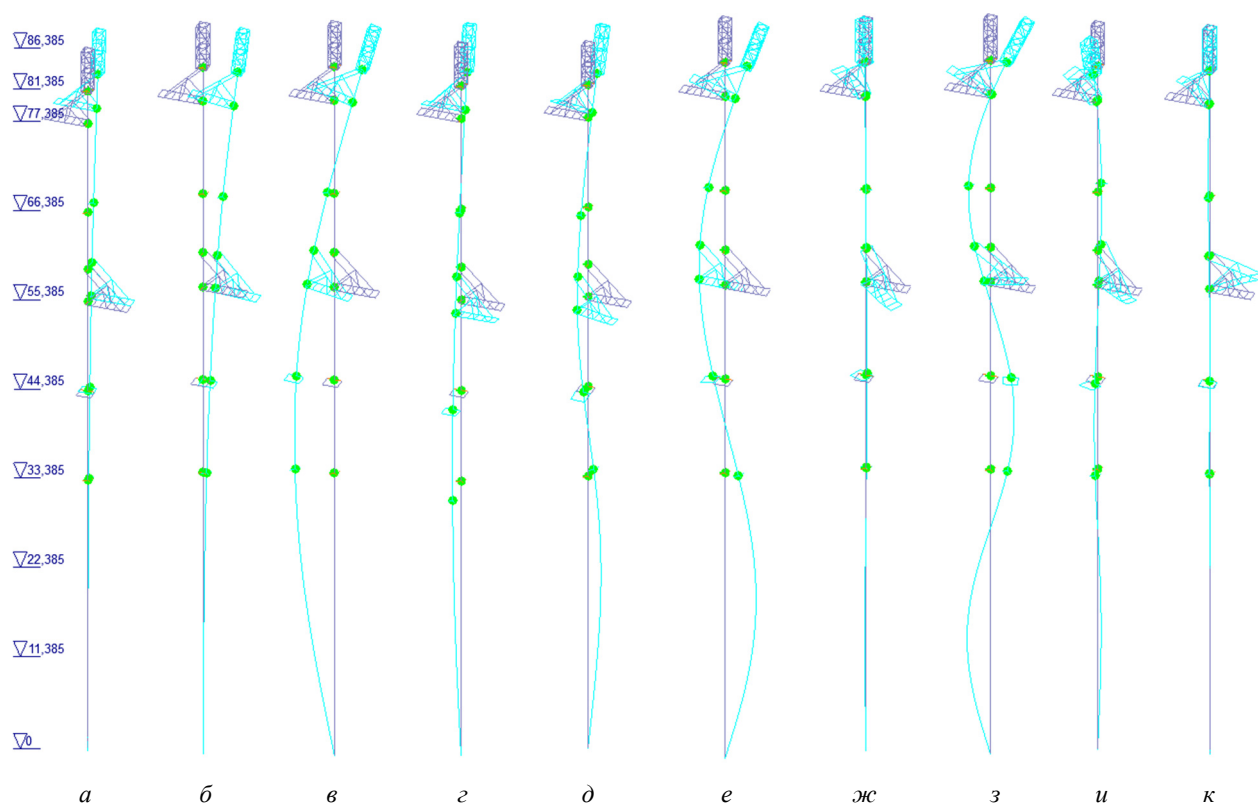


Рис. 7. Первые десять форм собственных колебаний мачты:

a, б — изгибные формы; *в, г* — изгибные с точкой перегиба в средней части ствола; *д, е* — локальные; *жс–к* — комбинированные

Источник: выполнено Ю.Д. Маркиной.

Figure 7. First ten natural vibration modes of the guyed mast:

a, б — curved shapes; *в, г* — curved shapes with a inflection point in the middle of the shaft; *д, е* — local; *жс–к* — combined

Source: made by Yu.D. Markina.

Таблица 2. Реакции в основании мачты и опорных узлах оттяжек
 Table 2. Support reactions at the mast base and guy anchor nodes

Узел / Node	Реакция, т / Reaction, t								
	Модель 1 / Model 1			Модель 2 / Model 2			Модель 3 / Model 3		
	RX	RY	RZ	RX	RY	RZ	RX	RY	RZ
1	0,00	–0,73	65,60	0,00	–0,72	65,58	0,00	–0,74	63,44
152	1,24	1,23	–2,13	1,24	1,23	–2,13	1,25	1,24	–2,14
153	1,75	–1,76	–3,01	1,74	–1,75	–3,00	1,72	–1,73	–2,95
154	–1,75	–1,76	–3,02	–1,74	–1,75	–3,00	–1,72	–1,73	–2,95
155	–1,24	1,23	–2,13	–1,24	1,23	–2,14	–1,25	1,24	–2,14
156	2,36	2,32	–3,81	2,20	2,16	–3,56	2,40	2,36	–3,88
157	3,74	–3,78	–6,12	3,59	–3,63	–5,88	3,51	–3,55	–5,73
158	–3,74	–3,78	–6,12	–3,59	–3,63	–5,87	–3,51	–3,55	–5,73
159	–2,36	2,32	–3,81	–2,20	2,16	–3,55	–2,40	2,36	–3,88

Узел 1 — опорный узел ствола мачты; узлы 152–159 — опорные узлы оттяжек /

Node 1 — support node at the mast base; nodes 152–159 — support nodes of the guy anchors

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

Дополнительное рассмотрение прожекторных башен и башни сотовой связи показало, что выявленная закономерность характерна не только для исследуемой мачты, но и для других антенно-мачтовых сооружений с асимметричным расположением площадок обслуживания. Количественные значения расхождений между расчетными моделями нельзя автоматически распространять на все сооружения, при необходимости они должны уточняться для каждого объекта с учетом его конструктивной схемы и характера асимметрии.

Полученные результаты согласуются с общей тенденцией, отмеченной в исследованиях ветровой работы телекоммуникационных башен с навесными элементами. В [11] показано, что лестницы, кабели и антенны, установленные на решетчатой телекоммуникационной башне, изменяют аэродинамические коэффициенты и распределение ветровой нагрузки на сооружение, что подтверждает исходное положение настоящей работы: площадки обслуживания и технологическое оборудование следует рассматривать не только как дополнительную массу, но и как элементы, изменяющие пространственную работу сооружения. Результаты [13; 21] показывают, что угол ветра, взаимное расположение антенн и эффект экранирования существенно влияют на ветровые нагрузки, действующие на решетчатые башни связи, что согласуется с полученными в настоящей работе данными, по которым основные различия между расчетными моделями проявляются в изгибающих моментах, горизонтальных перемещениях и высших формах колебаний, то есть в параметрах, чувствительных к пространственному перераспределению нагрузки. В [24] численно показано, что форма и равномерность размещения антенн влияют на чувствительность ветровой нагрузки к направлению ветра. При симметричном расположении антенн поперечная сила и изгибающий момент становятся менее чувствительными к изменению направления ветра. Этот вывод близок к результатам настоящего исследования: асимметричное расположение площадок обслуживания приводит к их более выраженному влиянию на изгибную работу и перемещению мачты. Khazaali и др. [25] отмечают, что точная оценка ветровых нагрузок на телекоммуникационные башни требует учета коэффициентов сопротивления и интерференционных факторов, а численное моделирование может применяться для оценки различных конфигураций башен и антенн. В данной работе аналогичная проблема рассматривается на уровне конечно-элементной модели: замена площадок эквивалентными нагрузками хорошо воспроизводит часть общих параметров, но не полностью отражает влияние пространственного расположения площадок на локальную работу и динамические характеристики сооружения. Таким образом, результаты настоящего исследования не противоречат данным других авторов, а дополняют их.

В большинстве рассмотренных работ основное внимание уделено аэродинамическим коэффициентам, ветровым нагрузкам и взаимодействию башни с антеннами, в данной статье акцент сделан на расчетной стороне задачи: сравнении детализированного и упрощенного способа передачи нагрузок от асимметрично расположенных площадок в конечно-элементную модель, что позволяет уточнить область применения упрощенных расчетных схем при анализе антенно-мачтовых сооружений.

4. Заключение

1. Способ учета площадок обслуживания по-разному влияет на расчетные параметры антенно-мачтового сооружения. Наименее чувствительны к детализации модели продольные усилия в стволе и реакции в опорных узлах. Для этих параметров замена площадок эквивалентными нагрузками может рассматриваться как допустимое инженерное упрощение, поскольку она сохраняет общий характер передачи вертикальных усилий в несущей системе.

2. Наиболее чувствительными к способу учета площадок являются параметры, связанные с пространственной изгибной работой и деформативностью верхней части сооружения. При асимметричном расположении площадок их явное моделирование позволяет учитывать не только дополнительную нагрузку, но и изменение геометрии и локальной жесткости расчетной схемы. Поэтому при поверочном расчете эксплуатируемых сооружений и оценке работы верхних участков ствола предпочтительно применять детализированную модель.

3. В результате сравнения горизонтальных перемещений выявлено, что упрощенная модель с эквивалентными нагрузками не полностью воспроизводит изменение деформативности сооружения, вызванное наличием площадок. Поэтому для предварительной оценки общей работы сооружения такая модель может быть использована, однако для уточненного анализа перемещений и оценки эксплуатационной пригодности всех элементов предпочтительно явное моделирование площадок.

4. Динамические характеристики также имеют различную чувствительность к составу расчетной модели. Низшие формы собственных колебаний, характеризующие глобальную работу сооружения, в меньшей степени зависят от способа учета площадок. Высшие и локальные формы оказываются более чувствительными к распределению массы и геометрической конфигурации вспомогательных элементов. Это ограничивает применение упрощенной модели при анализе динамического поведения верхних участков конструкции.

5. Реакции в основании антенно-мачтового сооружения и анкерных узлах оттяжек могут использоваться как параметры контроля общей согласованности расчетных моделей, однако они недостаточны для оценки влияния асимметрично расположенных площадок на локальную работу сооружения. Основные различия между моделями проявляются не на уровне опорных реакций, а в изгибной работе, перемещениях и локальных динамических характеристиках.

Полученные результаты показывают, что степень детализации расчетной модели следует выбирать с учетом цели расчета и особенностей конструктивного решения объекта. Для общей оценки работы антенно-мачтового сооружения и предварительного анализа допускается использование модели с эквивалентными нагрузками от асимметрично расположенных площадок. Для проверки прочности и деформативности элементов в зонах размещения площадок, а также для анализа высших форм собственных колебаний необходимо применять более детализированную расчетную схему.

Научная новизна работы заключается в количественной оценке влияния различных способов учета элементов, формирующих выраженную геометрическую асимметрию конструкции, на статические и динамические параметры антенно-мачтового сооружения, а также в выявлении различной чувствительности силовых, деформационных и динамических характеристик конструкции к степени детализации расчетной модели.

Теоретическая значимость работы состоит в уточнении представлений о влиянии асимметрично расположенных вспомогательных конструктивных элементов на пространственную работу и динамическое поведение антенно-мачтовых сооружений.

Практическая значимость результатов заключается в обосновании рационального подхода к формированию расчетных моделей антенно-мачтовых сооружений. Показано, что использование упрощенных расчетных схем с учетом площадок, формирующих выраженную геометрическую асимметрию конструкции, в виде эквивалентных нагрузок может быть допустимо при оценке продольных усилий и глобальных динамических характеристик сооружения. Однако для корректного анализа изгибающих моментов, горизонтальных перемещений и локальных форм колебаний предпочтительно применять расчетные модели с явным моделированием площадок обслуживания.

Список литературы

1. 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. Vol. 127. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.10.004>
2. 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 // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 4. Article no.1984. <https://doi.org/10.3390/app12041984> EDN: UNGRWA
3. Кашиварова Г.Г. Синергия численных методов и интеллектуальных технологий в диагностике строительных объектов // *Academia. Архитектура и строительство*. 2025. № 3. С. 140–145. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2025-3-140-145> EDN: PJOBAI
4. Чемодуров В.Т., Ажержмачев С.Г., Пишеничная-Ажержмачёва К.С. Проблемы обеспечения соответствия расчетных схем строительных конструкций реальной работе сооружений при эксплуатации // *Экономика строительства и природопользования*. 2018. № 3 (68). С. 5–8. EDN: YWMMHJ
5. Zhang Y., Hao R., Niiranen J., Yang Y., Brühwiler E., Su D., Nagayama T. Computational engine for finite element digital twins of structural dynamics via motion data // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 316. Article no. 118630. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118630> EDN: HZKXOI
6. Xu Y., Chen B., Wang J., Li Z. Model updating of complex civil engineering structures using hybrid optimization algorithms // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 252. Article no. 113657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113657>
7. Sun H., Betti R. System identification and finite element model updating for structural health monitoring: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 167. Article no. 108472. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108472>
8. Sun Z., Jayasinghe S., Sidiq A., Setunge S. Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A Comprehensive Review // *Sensors*. 2025. Vol. 25. No. 1. Article no. 59. <https://doi.org/10.3390/s25010059> EDN: QVPELT
9. Poddaeva O., Fedosova A. Computational and experimental simulation of wind impacts on a lattice structure // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.274>
10. Haidarpour A., Fah Tee K. Finite element model updating for structural health monitoring // *Structural Durability and Health Monitoring*. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792> EDN: BGZSUK
11. Calotescu I., Torre S., Freda A., Solari G. Wind tunnel testing of telecommunication lattice towers equipped with ancillaries // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. Article no. 112526. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112526> EDN: RQNDJA
12. 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. Article no. 2150105. <https://doi.org/10.1142/S0219455421501054> EDN: GQYSUL
13. Martin P., Elena V.B., Loredou-Souza A.M., Camaño E.B. Experimental study of the effects of dish antennas on the wind loading of telecommunication towers // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016. Vol. 149. P. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.11.010>
14. 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. Vol. 12. No. 9. Article no. 428. <https://doi.org/10.3390/buildings12091428> EDN: FJSQVE
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. Vol. 197. Article no. 104078. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104078> EDN: MEZHDB
16. 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
17. 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. Vol. 252. Article no. 113575. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113575> EDN: LJNXDT

18. 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. Vol. 38. P. 727–749. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02596-w> EDN: QXLUJQ
19. 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> EDN: UGRPYB
20. Li M., Li H., Wen Y. Design and Performance Study of a Six-Leg Lattice Tower for Wind Turbines // *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 4. Article no. 965. <https://doi.org/10.3390/buildings14040965> EDN: PDHMC
21. Carril C.F., Isyumov N., Brasil R.M.L.R.F. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003. Vol. 91. No. 8. P. 1007–1022. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(03\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(03)00049-7)
22. Маркина Ю.Д. Алгоритм оценки ветровой нагрузки на рабочие площадки антенно-мачтовых сооружений в условиях цифровизации расчетов // Омский научный вестник. 2026. № 2 (198). С. 60–68. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-60-68>
23. Langlois S., Prud'homme S., Légeron F., Pourshargh F. Review of advanced modelling methods for lattice steel towers // *CIGRE-IEC Colloquium on Overhead Lines*. 2016. P. 1–8. URL: https://www.academia.edu/108286712/Review_of_advanced_modelling_methods_for_lattice_steel_towers (accessed: 27.02.2026).
24. Jia Y., Huang J., Liu Q., Zhao Z., Dong M. Analysis of the Influence of antenna arrangement parameters on the aerodynamic performance of telecommunication towers // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 6. Article no. 2538. <https://doi.org/10.3390/app14062538> EDN: YXAMSN
25. 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. Vol. 3. No. 1. P. 66–83. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2024.02.001> EDN: LYXCFY

References

1. 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>
2. Kassem MM, 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. *Applied Sciences*. 2022;12(4):1984. <https://doi.org/10.3390/app12041984> EDN: UNGRWA
3. Kashevarova GG. Synergy of numerical methods and intelligent technologies in diagnostics of construction sites. *Academia. Architecture and Construction*. 2025;(3):140–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2025-3-140-145> EDN: PJOBAI
4. Chemodurov VT, Azhermachev SG, Pshenichnaya-Azhermacheva KS. Problems of ensuring the correspondence between computational schemes of building structures and the real behavior of structures during operation. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2018;(3):5–8. (In Russ.) EDN: YWMMHJ
5. Zhang Y, Hao R, Niiranen J, Yang Y, Brühwiler E, Su D, Nagayama T. Computational engine for finite element digital twins of structural dynamics via motion data. *Engineering Structures*. 2024;316:118630. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118630> EDN: HZKXOI
6. Xu Y, Chen B, Wang J, Li Z. Model updating of complex civil engineering structures using hybrid optimization algorithms. *Engineering Structures*. 2022;252:113657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113657>
7. Sun H, Betti R. System identification and finite element model updating for structural health monitoring: a review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022;167:108472. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108472>
8. Sun Z, Jayasinghe S, Sidiq A, Setunge S. Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: a comprehensive review. *Sensors*. 2025;25(1):59. <https://doi.org/10.3390/s25010059> EDN: QVPELT
9. Poddaeva O, Fedosova A. Computational and experimental simulation of wind impacts on a lattice structure. *Energy Reports*. 2023;9:355–361. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.274>
10. Haidarpour A, Fah Tee K. Finite element model updating for structural health monitoring. *Structural Structural Durability and Health Monitoring*. 2020;14(1):1–17. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792> EDN: BGZSUK
11. Calotescu I, Torre S, Freda A, Solari G. Wind tunnel testing of telecommunication lattice towers equipped with ancillaries. *Engineering Structures*. 2021;241:112526 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112526> EDN: RQNDJA
12. Li HN, Liu HJ, Fu X, Zhao K, Yang XL, Wen ZF. 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

13. Martin P, Elena VB, Loredo-Souza AM, Camaño EB. Experimental study of the effects of dish antennas on the wind loading of telecommunication towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016;149:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.11.010>
14. 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> EDN: FJSQVE
15. Fernández Lorenzo I, Clavelo Elena B, Martín Rodríguez P, Elena Parnás VB. 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. Markina YuD. 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
17. 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
18. Kenéz Á, Joó AL. 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
19. Markina YuD. Influence of technological equipment placement on the results of numerical simulation of a cellular communication tower. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025;4(196):26–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-26-34> EDN: UGRPYB
20. Li M, Li H, Wen Y. Design and performance study of a six-leg lattice tower for wind turbines. *Buildings*. 2024;14(4):965. <https://doi.org/10.3390/buildings14040965> EDN: PDHMCM
21. Carril CF, Isyumov N, Brasil RMLRF. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003;91(8):1007–1022. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(03\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(03)00049-7)
22. Markina YuD. Algorithm for assessing wind loads on working platforms of antenna-mast structures under conditions of digitalized engineering analysis. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):32–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-32-39> EDN: SSZCZD
23. Langlois S, Prud'homme S, Légeron F, Pourshargh F. Review of advanced modelling methods for lattice steel towers. *CIGRE-IEC Colloquium on Overhead Lines*. 2016:1–8. Available from: https://www.academia.edu/108286712/Review_of_advanced_modelling_methods_for_lattice_steel_towers (accessed: 27.02.2026).
24. Jia Y, Huang J, Liu Q, Zhao Z, Dong M. Analysis of the influence of antenna arrangement parameters on the aerodynamic performance of telecommunication towers. *Applied Sciences*. 2024;14(6):2538. <https://doi.org/10.3390/app14062538> EDN: YXAMSN
25. 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