



УДК 624.97:624.042.4

Ю. Д. МАРКИНА, канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики

ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ ПЕРЕДАЧИ НАГРУЗОК ОТ ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТЧАТОЙ БАШНИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: tstm@nngasu.ru, poluektoff@bk.ru

Ключевые слова: антенно-мачтовые сооружения, башня сотовой связи, технологическое оборудование, расчет несущей способности, ветровая нагрузка, укрупненное приложение нагрузки, коэффициент использования, собственные колебания.

В инженерной практике расчета антенно-мачтовых сооружений нагрузки от антенно-фидерных устройств нередко задаются укрупненно, без точного учета узлов фактического крепления, однако влияние такого упрощения на результаты расчета изучено недостаточно. Цель работы – оценка влияния степени детализации схемы передачи нагрузок от технологического оборудования на напряженно-деформированное состояние металлической башни сотовой связи. Исследование выполнено методом конечных элементов в ПК SCAD Office. Сопоставлены результаты двух вариантов моделирования: с точным приложением нагрузок от оборудования в фактические узлы крепления и с их укрупненным распределением по узлам поясов ближайшего яруса. Проанализированы коэффициенты использования несущей способности элементов, горизонтальные перемещения, периоды и формы собственных колебаний. Установлено, что укрупненное приложение нагрузок допустимо при общей оценке работы сооружения, однако при анализе локальной работы элементов решетки, к которым крепится оборудование, и уточнении динамических характеристик сооружения, предпочтительно точное задание нагрузок.

Введение

Антенно-мачтовые сооружения относятся к пространственным стержневым системам, чувствительным к действию ветровых и эксплуатационных нагрузок [1, 2]. Существенное влияние на их работу оказывает технологическое оборудование, размещаемое на различных отметках ствола. Вопросам расчета антенно-мачтовых сооружений посвящен значительный объем исследований, в которых рассматриваются особенности работы решетчатых башен под действием ветровых нагрузок [3–7], влияние геометрии сооружения [8–11], высотного расположения оборудования [12–14] и способы численного моделирования пространственных стержневых систем [15–17]. Отдельное внимание уделяется определению нагрузок от антенного оборудования и оценке их влияния на напряженно-деформированное состояние опор связи [18–20].

Антенно-мачтовые сооружения в процессе эксплуатации регулярно переоснащаются, а проверка их несущей способности требует учета не только массы, но и схемы передачи нагрузок от оборудования на ствол сооружения. При этом в реальной инженерной практике полные сведения о фактическом



расположении оборудования и элементах его крепления доступны не всегда. При отсутствии полной информации о схеме крепления оборудования инженер вынужден задавать нагрузку укрупненно: не в фактические узлы крепления, а распределять суммарное усилие по узлам ближайшего яруса несущей конструкции. Такое упрощение удобно при построении расчетной модели, однако степень его влияния на результаты расчета сооружения изучена недостаточно. Это определяет актуальность настоящей работы.

Целью работы является оценка влияния степени детализации схемы передачи нагрузок от технологического оборудования на результаты расчета металлической решетчатой башни сотовой связи.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Сформированы расчетные схемы металлической решетчатой башни с различными вариантами приложения нагрузок от оборудования.
2. Выполнено численное моделирование сооружения методом конечных элементов.
3. Проведено сопоставление коэффициентов использования несущей способности поясов, раскосов и распорок при точном и укрупненном приложении нагрузок.
4. Оценено влияние способа задания нагрузок на горизонтальные перемещения башни.
5. Выполнен анализ периодов и форм собственных колебаний сооружения.
6. Сформулированы рекомендации по области допустимого применения укрупненной схемы задания нагрузок, что составляет основную практическую значимость исследования.

Полученные результаты позволяют обосновать, в каких случаях такое упрощение может использоваться для оценки несущей способности сооружения, а в каких – способно привести к существенным отклонениям и требует более детализированного моделирования.

Методы исследования

Объектом исследования является металлическая решетчатая башня сотовой связи высотой 79,2 м, расположенная в Рязанской области Российской Федерации. Общий вид сооружения и его геометрическая схема приведены на рис. 1 цв. вклейки и рис. 1. Размеры элементов и сечения антенной опоры приняты согласно предоставленному техническому отчету.

Общее количество оборудования, размещенного и планируемого к размещению на АМС – 73 позиции, суммарная площадь оборудования составляет 32,00 м², суммарная масса – 1484,50 кг.

Климатические условия площадки строительства в соответствии с СП 20.13330.2016 «Свод правил. Нагрузки и воздействия»: ветровой район – I, тип местности – А, нормативное ветровое давление – 23,4 кгс/м²; гололедный район – II; сейсмичность района – до 6 баллов. В соответствии с табл. 2 ГОСТ Р 27751-2014 и п. 7 статьи 16 ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» башня относится к сооружениям повышенного уровня ответственности; коэффициент надежности по ответственности принят равным 1,1.

**К СТАТЬЕ Ю. Д. МАРКИНОЙ «ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ
ПЕРЕДАЧИ НАГРУЗОК ОТ ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТЧАТОЙ БАШНИ»**



Рис. 1. Общий вид башни высотой 79,2 м и установленного на ней оборудования

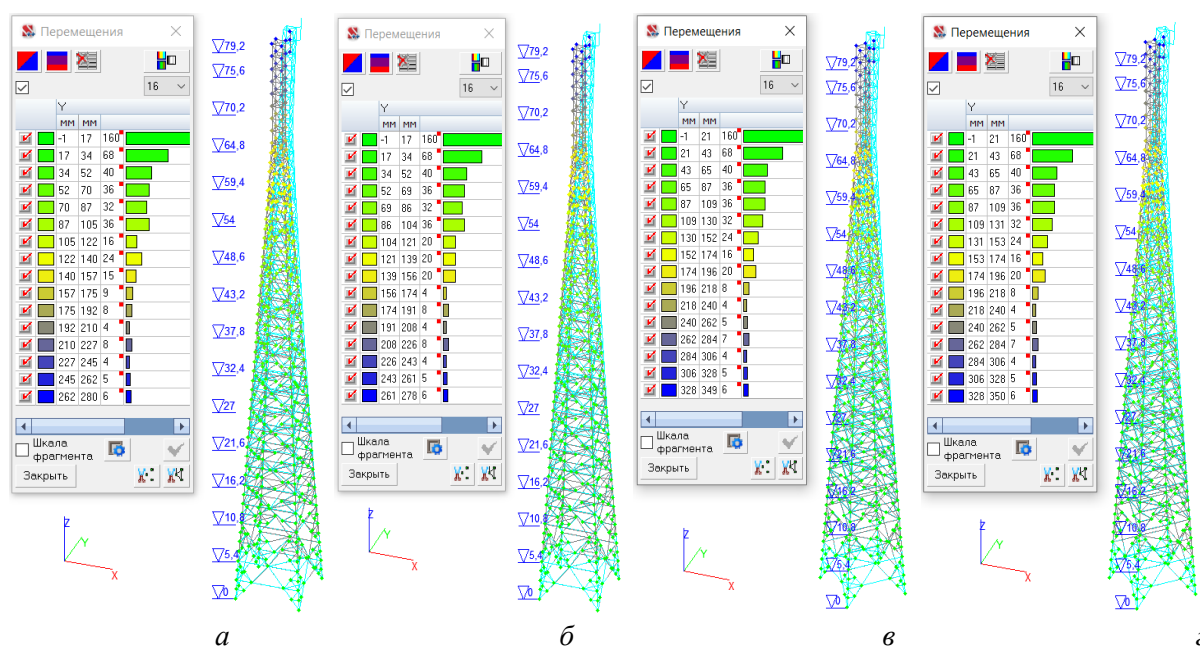


Рис. 2. Перемещения башни от комбинации нормативных нагрузок для расчетных случаев: *а* – PC1; *б* – PC2; *в* – PC3; *г* – PC4

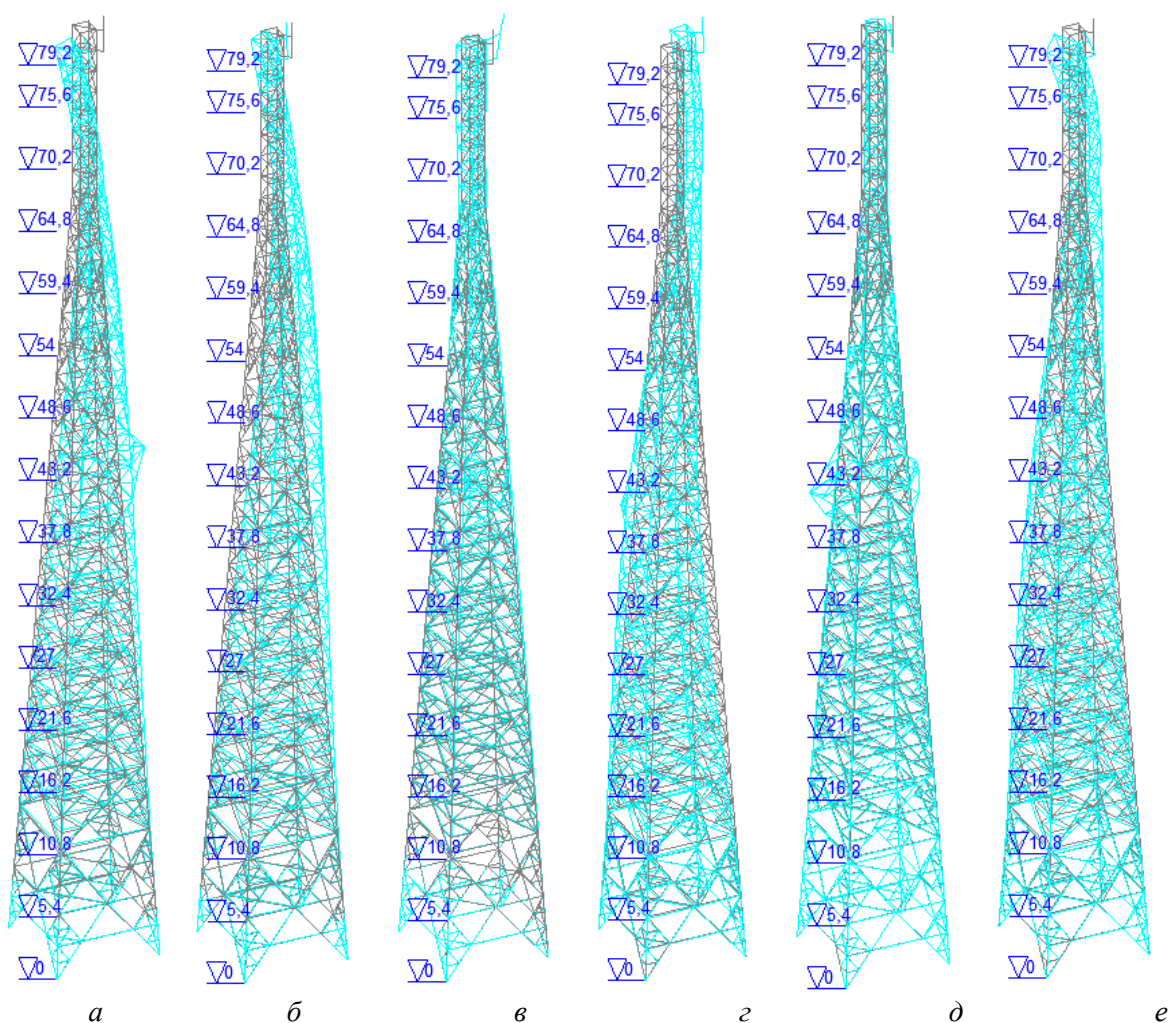


Рис. 3. Формы собственных колебания башни: *а* – PC1 форма 4; *б* – PC2 форма 4; *в* – PC1 форма 6; *г* – PC2 форма 6; *д* – PC1 форма 7; *е* – PC2 форма 7

A_i – наветренная площадь единицы оборудования с учетом креплений и трубостоек.

Для оценки влияния способа передачи нагрузки от оборудования были рассмотрены четыре расчетных случая:

- РС1 – точное приложение нагрузок от оборудования в узлы фактического крепления при расчетном направлении ветра $W1$ (рис. 2);
- РС2 – укрупненное приложение нагрузок от оборудования при расчетном направлении ветра $W1$ (рис. 2);
- РС3 – точное приложение нагрузок от оборудования в узлы фактического крепления при расчетном направлении ветра $W2$ (рис. 2);
- РС4 – укрупненное приложение нагрузок от оборудования при расчетном направлении ветра $W2$ (рис. 2).

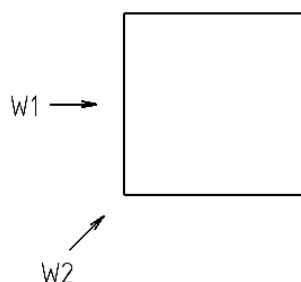


Рис. 2. Расчетные направления ветра

Под точным приложением нагрузки понималось задание весовых и ветровых усилий непосредственно в те узлы расчетной схемы, которые соответствуют фактическим местам крепления оборудования и элементов его подвеса. Под укрупненным приложением нагрузки понималось распределение суммарной нагрузки от оборудования, установленного на данной отметке, поровну по всем узлам поясов ближайшего сверху относительного фазового центра оборудования яруса без учета реальной схемы крепежных элементов. На отметках 35,1 м, 40,5 м и 75,6 м оборудование фактически крепится не к поясам, а к центрам распорок, что потенциально делает эти уровни наиболее чувствительными к переходу от точной схемы приложения нагрузки к укрупненной.

Расчет башни выполнялся в стержневой постановке как для пространственной статически неопределимой системы. В расчетной модели учитывались собственный вес конструкции, вес антенно-фидерных устройств, дополнительные весовые нагрузки от вспомогательных и соединительных элементов, статическая и динамическая составляющие ветрового воздействия, гололедные нагрузки.

Для сопоставления результатов расчета анализировались следующие параметры:

- 1) коэффициенты использования поясов;
- 2) коэффициенты использования раскосов;
- 3) коэффициенты использования распорок;
- 4) горизонтальные перемещения башни;
- 5) периоды первых десяти форм собственных колебаний.



Такой набор параметров позволял оценить как локальное влияние способа приложения нагрузки на отдельные элементы конструкции, так и глобальное влияние на общую деформативность и динамические характеристики сооружения.

Коэффициент использования несущей способности элемента определялся как отношение расчетного параметра, полученного по наиболее неблагоприятной нормативной проверке элемента на прочность, устойчивость и гибкость, к его допускаемому значению.

Для количественной оценки влияния укрупненного приложения нагрузок вычислялось относительное отклонение исследуемого параметра по отношению к результату, полученному при точном приложении нагрузки:

$$\delta = \frac{X_{\text{укр}} - X_{\text{точн}}}{X_{\text{точн}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $X_{\text{укр}}$ – значение исследуемого параметра при укрупненном приложении нагрузки;

$X_{\text{точн}}$ – значение того же параметра при точном приложении нагрузки.

Сопоставление проводилось попарно: РС1–РС2 и РС3–РС4, что позволило исключить влияние изменения направления ветра на результаты сравнения и выделить именно эффект, обусловленный способом задания нагрузок от оборудования.

Результаты

Сравнительный анализ результатов расчета показал, что влияние способа задания нагрузок от оборудования на работу башни носит неоднородный характер и зависит как от типа рассматриваемого параметра, так и от конструктивной роли элемента в пространственной системе сооружения. Наиболее заметно различия проявляются в элементах, непосредственно вовлеченных в локальное перераспределение усилий в зонах размещения оборудования. Параметры, характеризующие общую работу сооружения: горизонтальные перемещения, реакции в опорах и низшие формы собственных колебаний, изменяются в меньшей степени.

Распределение коэффициентов использования поясов по высоте (рис. 3а) показывает, что данный тип элементов в наименьшей степени чувствителен к изменению схемы передачи нагрузок от оборудования. Расхождения между вариантами расчета с точным и укрупненным приложением нагрузок не превышают 3 % и не приводят к качественному изменению оценки их работы. Это объясняется тем, что пояса формируют основной несущий контур башни и воспринимают суммарное действие нагрузок в усредненном виде, вследствие чего локальные особенности приложения нагрузок от оборудования оказывают на них ограниченное влияние.

Для раскосов влияние способа задания нагрузок выражено несколько сильнее (рис. 3б), но не является определяющим для общей оценки напряженно-деформированного состояния. Изменение коэффициентов использования по высоте не превышает 6 %, имеет локальный характер и связано с перераспределением усилий между соседними панелями при переходе от точного приложения нагрузок в узлы фактического крепления оборудования к их укрупненной передаче на узлы ближайшего яруса. При этом общая картина работы раскосной системы сохраняется.

Наиболее выраженное влияние способа приложения нагрузок выявлено для распорок (рис. 3в). Максимальные локальные расхождения совпадают с уровнями,



на которых оборудование фактически крепится не к поясам, а к центрам распорок: на отм. 35,1 м – 14 %; на отм. 40,5 м – 49 %; на отм. 75,6 м – 14 %. В этих зонах укрупненное распределение нагрузки по узлам поясов ближайшего яруса в наибольшей степени искажает реальную схему передачи усилий. На остальных участках чувствительность распорок к перераспределению нагрузок существенно ниже: относительное отклонение не превышает 6 %, для большинства элементов составляет 0 %.

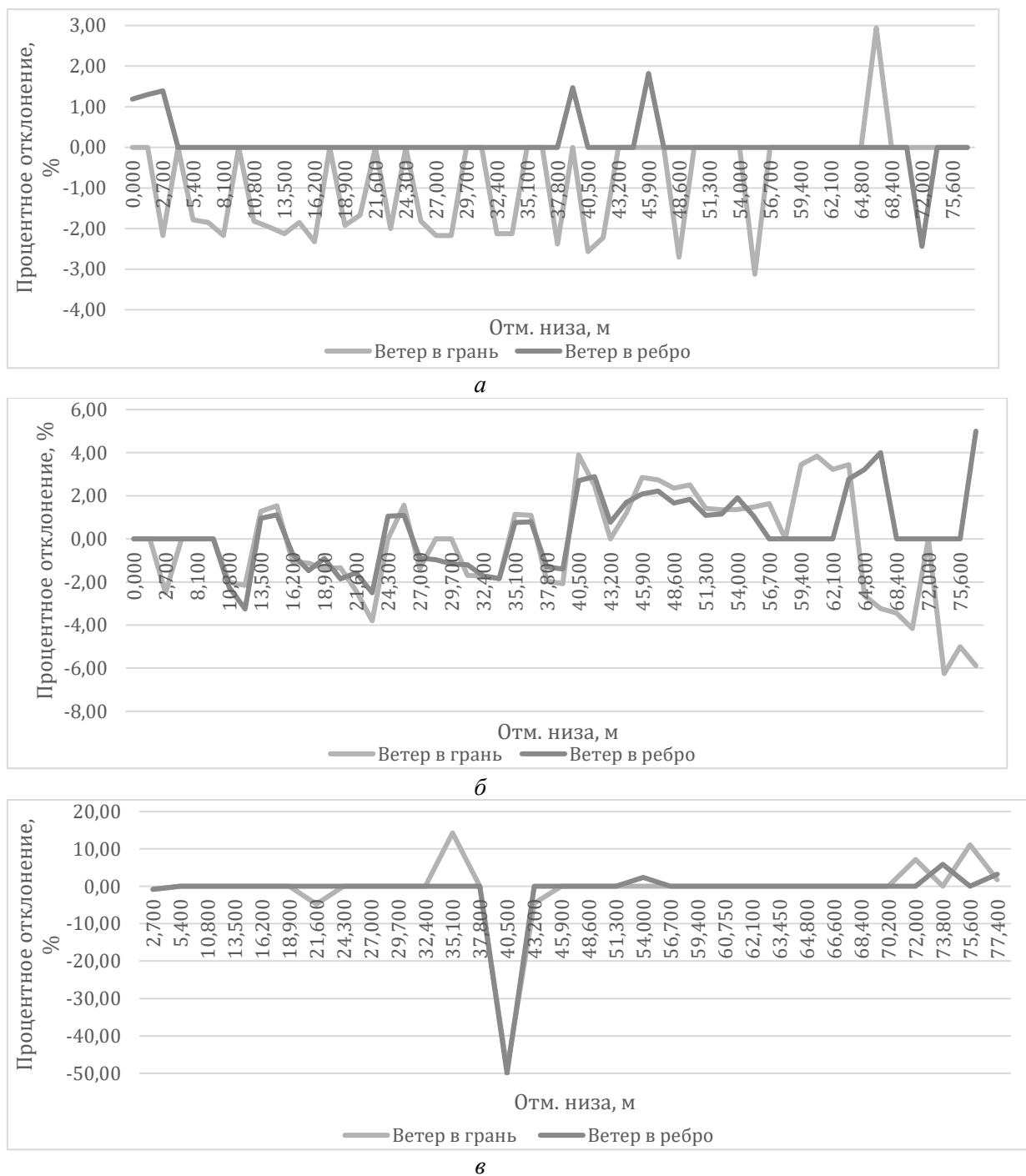


Рис. 3. Отклонение коэффициентов использования усилий при перераспределении нагрузок от оборудования: *a* – поясов; *б* – раскосов; *в* – распорок



Сопоставление горизонтальных перемещений (рис. 4 и рис. 2 цв. вклейки) показало, что изменение способа приложения нагрузок от оборудования практически не влияет на общую деформативность башни. Отклонение максимальных горизонтальных перемещений между рассматриваемыми расчетными случаями не превышает 2 %. Это свидетельствует о том, что для оценки глобальной жесткости сооружения и общей формы деформирования укрупненная схема задания нагрузок может использоваться без существенной потери точности.

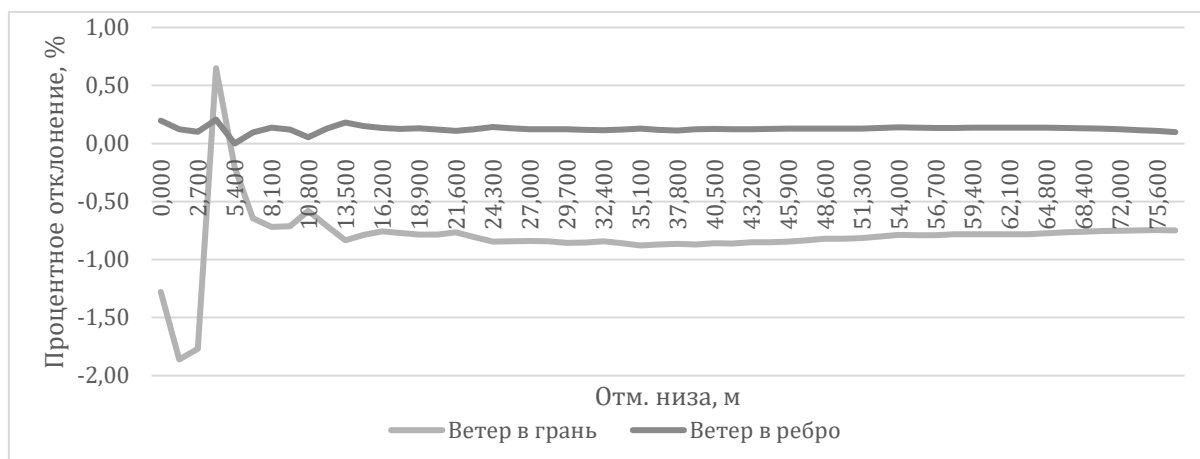


Рис. 4. Отклонение перемещений при перераспределении нагрузок от оборудования

Анализ периодов собственных колебаний (рис. 5 и табл.) показал, что влияние способа передачи нагрузок на динамические характеристики башни носит избирательный характер. Для первых форм, определяющих глобальную работу сооружения, различия между расчетными случаями незначительны. Это свидетельствует о том, что низшие изгибные формы в основном определяются общей геометрией, жесткостью и массой башни и антенно-фидерных устройств, а не локальными особенностями приложения нагрузок от оборудования. Для высших форм различия становятся более выраженными. Наибольшие отклонения периодов зафиксированы для 8–10-й форм, что указывает на чувствительность локальной динамики верхних ярусов к схеме передачи нагрузок. При этом наиболее характерные различия в конфигурации форм наблюдаются для 4-й, 6-й и 7-й форм (рис. 3 цв. вклейки). Следовательно, укрупненное приложение нагрузок практически не изменяет глобальную динамику сооружения, но может влиять на локальные формы колебаний, связанные с зонами размещения оборудования.

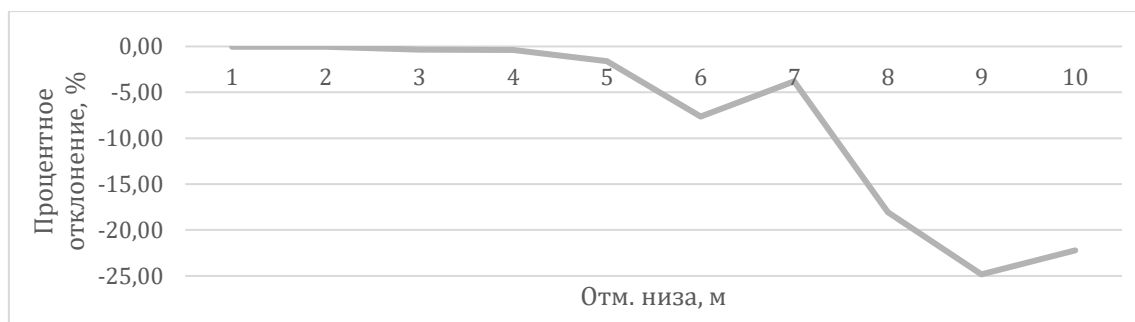


Рис. 5. Отклонение периодов собственных колебаний при перераспределении нагрузок от оборудования



Таблица

Периоды собственных колебаний башни для различных расчетных случаев

Форма собственных колебаний	Период собственных колебаний, сек		Процентное отклонение, %
	PC1, PC3	PC2, PC4	
1	1,1136	1,1131	-0,04
2	1,1129	1,1125	-0,04
3	0,392	0,3907	-0,33
4	0,3897	0,3882	-0,38
5	0,2129	0,2095	-1,60
6	0,206	0,1903	-7,62
7	0,1924	0,1851	-3,79
8	0,1828	0,1498	-18,05
9	0,1619	0,1217	-24,83
10	0,1499	0,1166	-22,21

Выводы

1. Схема передачи нагрузок от технологического оборудования является самостоятельным фактором, влияющим на результаты расчета металлической решетчатой башни сотовой связи.

2. Укрупненное приложение нагрузок слабо влияет на общую работу сооружения: горизонтальные перемещения, работу основных несущих элементов, реакции в опорах и низшие формы собственных колебаний изменяются незначительно. Поэтому такая схема может применяться при общей оценке несущей способности конструкции, предварительных расчетах, вариантном сравнении решений и экспресс-оценке работы башни.

3. Наибольшая чувствительность к способу задания нагрузок выявлена у элементов, участвующих в локальном перераспределении усилий в зонах размещения оборудования. В рассматриваемой башне это прежде всего распорки, к которым оборудование фактически крепится на отдельных отметках.

4. При детальной проверке элементов решетки в местах крепления оборудования, а также при уточнении высших форм собственных колебаний укрупненное приложение нагрузок не обеспечивает полной эквивалентности точной схеме и должно применяться с осторожностью.

5. Выбор степени детализации расчетной модели должен определяться целью расчета: для общей оценки допустимо укрупнение нагрузок, для локального анализа элементов и динамики верхних ярусов предпочтительно точное приложение нагрузок в фактические узлы крепления.

6. Полученные результаты подтверждают целесообразность дифференцированного подхода к формированию расчетных схем антенно-мачтовых сооружений, при котором степень детализации модели выбирается с учетом требуемой точности и характера решаемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савицкий, Г. А. Расчет антенных сооружений. Физические основы / Г. А. Савицкий. – Москва : Связь, 1978. – 152 с.



2. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан ; под редакцией Б. Е. Маслова. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с.
3. Wu, P. Research on wind load characteristics on the surface of a towering precast television tower with a grid structure based on Large Eddy Simulation / P. Wu, G. Chen, R. Feng, F. He // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – № 9. – Article 1428. – DOI 10.3390/buildings12091428.
4. Маркина, Ю. Д. Расчетные направления ветра при экспертизе несущей способности трехгранных антенно-мачтовых сооружений / Ю. Д. Маркина // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2025. – Т. 21. – № 4. – С. 334–345. – DOI 10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345. – EDN CIVXMF.
5. Маркина, Ю. Д. Автоматизация сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню / Ю. Д. Маркина // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2025. – Т. 22. – № 9. – С. 23–30. – DOI 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030.
6. Кирсанов, М. Н. Деформации пространственной модели трехгранной стержневой башни с двойной решеткой / М. Н. Кирсанов // *Вестник МГСУ*. – 2023. – Т. 18. – Вып. 7. – С. 1032–1038. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038.
7. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1978. – 216 с.
8. 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, E. Efthymiou // *Structures*. – 2020. – Vol. 27. – P. 2379–2399. – DOI 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
9. Kefal, A. Topology optimization of cracked structures using peridynamics / A. Kefal, A. Sohoul, E. Oterkus, M. Yildiz, A. Suleman // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2019. – Vol. 31. – P. 1645–1666. – DOI 10.1007/s00161-019-00804-w.
10. Голиков, А. В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен / А. В. Голиков, Д. В. Веремеев // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2023. – № 1 (90). – С. 14–32.
11. Облетов, Е. Н. Анализ и совершенствование конструкций стальных решетчатых башен: обзор / Е. Н. Облетов, Н. Ю. Трянина, Е. С. Зубанов, М. Г. Зайцева. – Текст : электронный // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*. – Нижний Новгород, 2025. – № 2 (74). – С. 75–93. – URL: <https://pnj.nngasu.ru/word/articles/2-2025/7.pdf>.
12. Liu, M. Wind loads on square lattice towers with tubular members based on wind tunnel test and numerical simulation / M. Liu, S. Wu, W. Guan, C. Zhang, Z. Xie // *Physics of Fluids*. – 2024. – Vol. 36. – № 12. – Article 127129. – DOI 10.1063/5.0243306.
13. Khazaali, M. A robust protocol to compute wind load coefficients of telecommunication towers and antennas using numerical simulation for risk and resilience assessment / M. Khazaali, L. Ma, K. Rokneddin, M. Mazzotti, P. Bocchini // *Resilient Cities and Structures*. – 2024. – Vol. 3. – № 1. – P. 66–83. – DOI 10.1016/j.rcns.2024.02.001.
14. Маркина, Ю. Д. Влияние расположения технологического оборудования на результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи / Ю. Д. Маркина // *Омский научный вестник*. – 2025. – № 4 (196). – С. 26–34. – DOI 10.25206/1813-8225-2025-196-26-34.
15. Zhang, D. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under skew winds / D. Zhang, X. Song, H. Deng, X. Hu, X. Ma // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2021. – Vol. 214. – Article 104678. – DOI 10.1016/j.jweia.2021.104678.
16. Мальков, Н. М. Постановка задачи численного моделирования процесса обтекания газоотводящих стволов вытяжных башен / Н. М. Мальков, Д. А. Кушова // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2012. – № 1 (10). – С. 121–124.



17. Маркина, Ю. Д. Автоматизация экспертизы несущей способности металлических решетчатых башен / Ю. Д. Маркина // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2026. – Т. 23. – № 3. – С. 27–34. – DOI 10.14489/vkit.2026.06.pp.027-034.

18. Gayatri, G. Comparative study of wind and ice loads on telecommunication towers in hilly terrain / G. Gayatri, B. T. Reddy, B. Narender // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 455. – Article 02021. – DOI 10.1051/e3sconf/202345502021.

19. Белаш, Т. А. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них / Т. А. Белаш, Р. Р. Сафин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – № 2 (41). – С. 18–28.

20. Трянина, Н. Ю. Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций / Н. Ю. Трянина, Е. Н. Облетов, И. А. Самохвалов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 1 (61). – С. 23–30. – EDN : NGWFXK.

MARKINA Yuliya Dmitrievna, candidate of technical sciences of the chair of theory of structures and technical mechanics

INFLUENCE OF THE LEVEL OF DETAIL IN THE LOAD TRANSFER SCHEME FROM EQUIPMENT ON THE ANALYSIS RESULTS OF A STEEL LATTICED TOWER

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia.

Tel.: (831) 430-54-96; e-mail: tstm@nngasu.ru, poluektoff@bk.ru

Key words: antenna-supporting structures, cellular communication tower, technological equipment, load-bearing capacity analysis, wind load, generalized load application, utilization factor, natural vibrations.

Cellular communication antenna-supporting structures are sensitive to the method used to define external actions, including loads from installed equipment. In engineering practice, such loads are often applied in a generalized manner, without accurately accounting for the actual attachment nodes; however, the influence of this simplification on the analysis results has not been sufficiently studied. The aim of this work is to assess the influence of the level of detail of the computational model on the stress-strain state of a steel cellular communication tower. The study was carried out using the finite element method in SCAD Office software. The results of two modeling approaches were compared: precise application of equipment loads to the actual attachment nodes and their generalized distribution to the chord nodes of the nearest panel. The utilization factors of structural members, horizontal displacements, and the periods and mode shapes of natural vibrations were analyzed. It was found that generalized load application is acceptable for an overall assessment of the structural behavior; however, for analyzing the local behavior of lattice members to which the equipment is attached and for refining the dynamic characteristics of the structure, precise load application is preferable.

REFERENCES

1. Savitskiy G. A. Raschet antenykh sooruzheniy. Fizicheskie osnovy [Calculation of antenna structures. Physical foundations]. Moscow, Svyaz, 1978, 152 p.

2. Simiu E., Skanlan R. Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind effects on structures]. pod red. B. E. Maslova. Moscow, Stroyizdat, 1984, 360 p.



3. 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, № 9, article 1428. DOI: 10.3390/buildings12091428.
4. Markina Yu. D. Raschetnye napravleniya vetra pri ekspertize nesushhey sposobnosti trekhgrannykh antenno-machtovykh sooruzheniy [Calculated wind directions in the load-bearing capacity assessment of triangular antenna-supporting structures]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2025, Vol. 21, № 4, P. 334–345. DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345. EDN: CIVXMF.
5. Markina Yu. D. Avtomatizatsiya sbora staticheskoy sostavlyayushhey vetrovoy nagruzki na reshetchatuyu bashnyu [Automation of collecting the static component of wind load on a lattice tower]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies]. 2025, Vol. 22, № 9, P. 23–30. DOI: 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030.
6. Kirsanov M. N. Deformatsii prostranstvennoy modeli trekhgrannoy sterzhnevoy bashni s dvoynoy reshetkoy [Deformations of a spatial model of a triangular rod tower with double lattice]. *Vestnik MGSU*, 2023, Vol. 18, Issue 7, P. 1032–1038. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038.
7. Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystvie vetra [Guide to the calculation of buildings and structures under wind action]. TsNIISK im. V.A. Kucherenko. Moscow, Stroyizdat, 1978, 216 p.
8. 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, Vol. 27, P. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
9. Kefal A., Sohoul A., Oterkus E., Yildiz M., Suleman A. Topology optimization of cracked structures using peridynamics. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019, Vol. 31, P. 1645–1666. DOI: 10.1007/s00161-019-00804-w.
10. Golikov A. V., Veremeev D. V. Obobshchennyye printsipy komponovki i naznacheniya gabaritnykh razmerov trekhgrannykh reshetchatykh bashen [Generalized principles of layout and assignment of overall dimensions of triangular lattice towers]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture]. 2023, № 1 (90), P. 14–32.
11. Obletov E. N., Tryanina N. Yu., Zubanov E. S., Zaytseva M. G. Analiz i sovershenstvovanie konstruktsey stalnykh reshetchatykh bashen: obzor [Analysis and improvement of steel lattice tower structures: Review]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2025, № 2 (74), P. 75–93.
12. Liu M., Wu S., Guan W., Zhang C., Xie Z. Wind loads on square lattice towers with tubular members based on wind tunnel test and numerical simulation. *Physics of Fluids*. 2024, Vol. 36, № 12, article 127129. DOI: 10.1063/5.0243306.
13. 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, № 1, P. 66–83. DOI: 10.1016/j.rcns.2024.02.001.
14. Markina Yu. D. Vliyanie raspolozheniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na rezultaty rascheta tsifrovoy modeli bashni sotovoy svyazi [Influence of technological equipment arrangement on the calculation results of a digital model of a cellular communication tower]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2025, № 4 (196), P. 26–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-26-34.
15. 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, Vol. 214, article 104678. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104678.



16. Malkov N. M., Kushova D. A. Postanovka zadachi chislennogo modelirovaniya processa obtekaniya gazootvodyashhikh stvolov vytyazhnykh bashen [Problem statement for numerical modeling of the flow around exhaust shafts of ventilation towers]. Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU [FEFU: School of Engineering Bulletin]. 2012, № 1 (10), P. 121–124.
17. Markina Yu. D. Avtomatizatsiya ekspertizy nesushhey sposobnosti metallicheskh reshchatykh bashen [Automation of load-bearing capacity assessment of steel lattice towers]. Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy [Herald of Computer and Information Technologies]. 2026, Vol. 23, № 3, P. 27–34. DOI: 10.14489/vkit.2026.06.pp.027-034.
18. Gayatri G., Reddy B. T., Narender B. Comparative study of wind and ice loads on telecommunication towers in hilly terrain. E3S Web of Conferences. 2023, Vol. 455, article 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202345502021.
19. Belash T. A., Safin R. R. Modelirovanie vetrovoy nagruzki dlya analiza aerodinamiki opor dvoynogo naznacheniya s antennami, ustanovlennymi na nikh [Modeling of wind load for aerodynamic analysis of dual-purpose supports with antennas installed on them]. Vestnik NITs Stroitelstvo [Bulletin of the Scientific Research Center of Construction]. 2024, № 2 (41), P. 18–28.
20. Tryanina N. Yu., Obletov E. N., Samokhvalov I. A. Aerodinamicheskoe vozdeystvie na panelnye anteny bazovykh stantsiy [Aerodynamic action on panel antennas of base stations]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. 2022, № 1 (61), P. 23–30. EDN: NGWFXK.

© Ю. Д. Маркина, 2026

Получено: 28.04.2026 г.