

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ БАШНИ СОТОВОЙ СВЯЗИ

Ю. Д. Маркина

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

Современные антенно-мачтовые сооружения, используемые для размещения оборудования беспроводной связи, характеризуются высокой чувствительностью к воздействию ветровой нагрузки. Геометрические особенности, форма и пространственное расположение антенн оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние несущих металлических конструкций.

В исследовании представлены результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи с учетом реального размещения антенн и различных направлений ветрового потока. Проведенный численный анализ показал, что применение ограниченного количества расчетных направлений ветровой нагрузки, основанных лишь на нормах СП 20.13330.2016, не обеспечивает необходимой точности расчета. Обоснована востребованность индивидуального подхода при выборе направлений воздействия и построении расчетных моделей с различной ориентацией конструкции относительно ветра. Полученные результаты актуальны при проектировании и реконструкции антенно-мачтовых сооружений, а также при их последующем дооборудовании.

Ключевые слова: антенно-мачтовые сооружения, ветровая нагрузка, решетчатые металлические конструкции, панельные антенны, цифровое моделирование, напряженно-деформированное состояние, аэродинамическое сопротивление, инженерный расчет.

Для цитирования: Маркина Ю. Д. Влияние расположения технологического оборудования на результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 26–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-26-34. EDN: UGRPYB.



© Маркина Ю. Д., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPACT OF THE LOCATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ON THE CALCULATION RESULTS OF THE DIGITAL CELL TOWER

Yu. D. Markina

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Russia, Nizhny Novgorod, Il'inskaya St., 68, 603000

Modern antenna-mast structures, used for housing wireless communication equipment, are characterized by high sensitivity to wind load effects. The geometric features, shape, and spatial arrangement of antennas significantly influence the stress-strain state of the load-bearing metal structures.

The study presents the calculation results of a digital model of a cell tower, taking into account the actual placement of antennas and various wind flow directions. The conducted numerical analysis shows that applying a limited number of wind load calculation directions, based solely on the norms of SP 20.13330.2016, does not provide the required calculation accuracy. The authors prove the necessity of an individual approach in selecting the directions of action and constructing computational models with varying structural orientations relative to the wind. The obtained results are relevant for the design and reconstruction of antenna-mast structures, as well as for their subsequent retrofitting.

Keywords: antenna-mast structures, wind load, lattice metal structures, panel antennas, digital modeling, stress-strain state, aerodynamic resistance, engineering calculation.



Введение

Развитие радиочастотных ресурсов, технологий беспроводной связи и повышение пропускной способности каналов передачи данных требует как внедрения нового высокотехнологичного оборудования, так и своевременной модернизации существующих систем связи. Обеспечение надёжности, дальности и устойчивого качества сигнала в современных условиях возможно лишь при комплексном совершенствовании технической инфраструктуры, включая опорные конструкции антенно-мачтовых сооружений (АМС).

В процессе развёртывания линий электропередачи, ретрансляционных систем телевидения, радиовещания, а также организации сетей мобильной и технологической связи, широкое распространение получили башенные металлоконструкции. Эти опоры, обладая относительной лёгкостью, технологичностью и гибкостью, характеризуются при этом низкими демпфирующими свойствами, что обуславливает их высокую чувствительность к ветровым нагрузкам. Особенно значительное влияние на напряжённо-деформированное состояние несущих элементов оказывает аэродинамическое воздействие ветра на размещённое антенное оборудование. Ветровая нагрузка, воспринимаемая конструкцией, напрямую зависит от геометрических характеристик и ориентации антенн, что требует всестороннего учёта при инженерных расчётах [1–4].

Парусность антенн, являющаяся одним из основных факторов, определяющих величину аэродинамической нагрузки, определяется не только их габаритными размерами, но и формой, конструктивным исполнением, углом атаки ветрового потока, а также коэффициентом аэродинамического сопротивления. Антенны с обтекаемой формой обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением по сравнению с плоскими конструкциями, что снижает их парусность и, соответственно, нагрузку на несущую часть мачты.

Следует отметить, что эксплуатируемые антенно-мачтовые сооружения подвергаются регулярному переоснащению, сопровождающемуся установкой дополнительного технологического оборудования. Такой процесс неизбежно приводит к увеличению эксплуатационных нагрузок, нередко приближая конструкцию к предельным значениям грузоподъёмности. При этом каждое вновь установленное устройство может оказывать существенное влияние на распределение внутренних усилий и напряжений в элементах несущего каркаса. В условиях наличия нескольких уровней установки оборудования конструкция оказывается под действием переменных по высоте и направлению ветровых потоков, создающих сложную схему нагружения [5–8].

Особую опасность для устойчивости сооружения представляет размещение антенн далеко за пределами центра тяжести мачты, что свойственно антеннам сотовой связи. Это приводит к значительному росту моментов сил, создающих

дополнительные изгибающие и крутильные напряжения. Пространственное распределение антенн и их взаимное расположение относительно направления основного ветрового потока обуславливают необходимость проведения точных аэродинамических расчётов, учитывающих как индивидуальные, так и интегральные характеристики оборудования. Неоднородность размещения антенн, их различная форма и ориентация способны радикально изменить ветровое воздействие, воспринимаемое конструкцией, и, как следствие, повлиять на её общее напряжённое состояние.

В условиях наращивания антенной нагрузки становится критически важным учитывать пространственную компоновку оборудования при проведении расчётных процедур. Однако в действующей нормативной документации, включая учебные пособия и методические рекомендации по проектированию АМС, отсутствуют какие-либо указания по учёту расположения антенн при выборе расчётных направлений ветровых нагрузок. Такой пробел в нормативной базе значительно затрудняет корректную инженерную оценку и может привести к занижению действительных расчётных усилий в элементах конструкции [9–12].

В статье представлены результаты численного моделирования АМС с учётом фактической конфигурации и пространственного расположения панельных антенн, а также обоснована необходимость включения параметров размещения технологических элементов в алгоритм выбора критических направлений нагружения, наряду с положениями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Объект и методы исследования

Объект исследования — металлическая башня сотовой связи высотой 73,575 м (рис. 1), расположенная в Московской области.

Основные характеристики конструктивного решения:

- вид решётчатой конструкции с 0,000 до +73,575 м — четырехгранная призма с подкосами на опорной раме;
- базовые размеры в плане 2,4×2,4 м;
- сечения поясов: с 0,000 до +11,900 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×13; с +11,900 до +23,800 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×14; с +23,800 до +35,700 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×13; с +35,700 до +59,370 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×5; с +59,370 и выше — горячедеформированные бесшовные трубы Ø102×5;
- сечения раскосов: с 0,000 до +11,900 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø76×10; с +11,900 до +73,575 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø54×4 по ГОСТу 8732–78;
- сечения распорок: с 0,000 до +73,575 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø57×4;
- конструкция подкосов и опорной рамы: 4 подкоса, крепление к стволу на отм. +9,520;



Рис. 1. Объект исследования
Fig. 1. Research object

Таблица 1. Перечень и ветровая нагрузка на антенны и радиомодули
Table 1. List and wind load on antennas and radio modules

Оборудование	Z , м	k	C_x	n , шт.	A_f , м ²	$n \cdot A_f$, м ²	F , кгс	$n \cdot F$, кгс
Установленное оборудование								
Панельная антенна HUAWEI ATR4518R2	73,00	1,798	1,4	3	0,60	1,80	49,72	149,16
Радиомодуль Huawei RRU	73,00	1,798	1,4	3	0,06	0,18	4,96	14,88
Радиомодуль Huawei RRU	73,00	1,798	1,4	6	0,12	0,72	9,91	59,46
Комбайнер	73,00	1,798	1,4	3	0,04	0,12	3,12	9,36
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м	72,50	1,794	1,4	1	0,28	0,28	23,29	23,29
Антенна PPC MiniLink Ø 1,2 м (2×ODU)	69,00	1,768	1,4	1	1,13	1,13	91,81	91,81
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м	69,00	1,768	1,4	2	0,28	0,56	22,95	45,90
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м (2×ODU)	69,00	1,768	1,4	3	0,28	0,84	22,95	68,85
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м	65,50	1,741	1,4	1	0,28	0,28	22,61	22,61
Антенна PPC Nokia Ø 0,6 м	65,50	1,741	1,4	1	0,28	0,28	22,61	22,61
Антенна PPC Nokia Ø 0,6 м	60,00	1,700	1,4	1	0,28	0,28	22,08	22,08
Антенна PPC CERAGON Ø 0,3 м	48,00	1,580	1,4	1	0,07	0,07	5,13	5,13
Антенна PPC Nokia Ø 0,3 м	60,00	1,700	1,4	1	0,07	0,07	5,52	5,52
Панельная антенна HXPM6X3WW17180 65T2CV2	36,00	1,450	1,4	3	0,79	2,37	52,51	157,53
Радиомодуль NSN Triple	36,00	1,450	1,4	3	0,28	0,84	18,36	55,08
УАФП-02	36,00	1,450	1,4	3	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
Абонентский трансивер	36,00	1,450	1,4	1	0,09	0,09	6,00	6,00
Планируемое к установке оборудование								
Панельная антенна MOBI MB4B-65-17DE-IN-43	73,00	1,798	1,4	3	0,53	1,59	43,67	131,01
Антенна PPC ERICSSON Ø 0,6 м	68,00	1,760	1,4	1	0,34	0,34	27,74	27,74
*полностью закрыт от ветра другим оборудованием. Суммарная наветренная площадь оборудования и трубостоек, размещенных и планируемых к размещению, принята к расчёту 11,43 м ² с учётом ориентации в плане и затенения. Z — высота расположения узла над поверхностью земли.								

в углах рамы на отм. 0,000; габаритные размеры рамы — 12×12 м; сечение подкосов с 0,000 до +9,520 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø219×10 по ГОСТу 8732–78; сечения рамы на 0,000 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø133×10 и Ø168×10 по ГОСТу 8732–78.

Все нагрузки на конструкцию рассчитаны в соответствии с действующей нормативной литературой. Ветровая нагрузка от технологического оборудования рассчитывалась с учётом ориентации в плане и затенения. Расчетная ветровая узловaя нагрузка от каждой антенны определяется по формуле, полу-

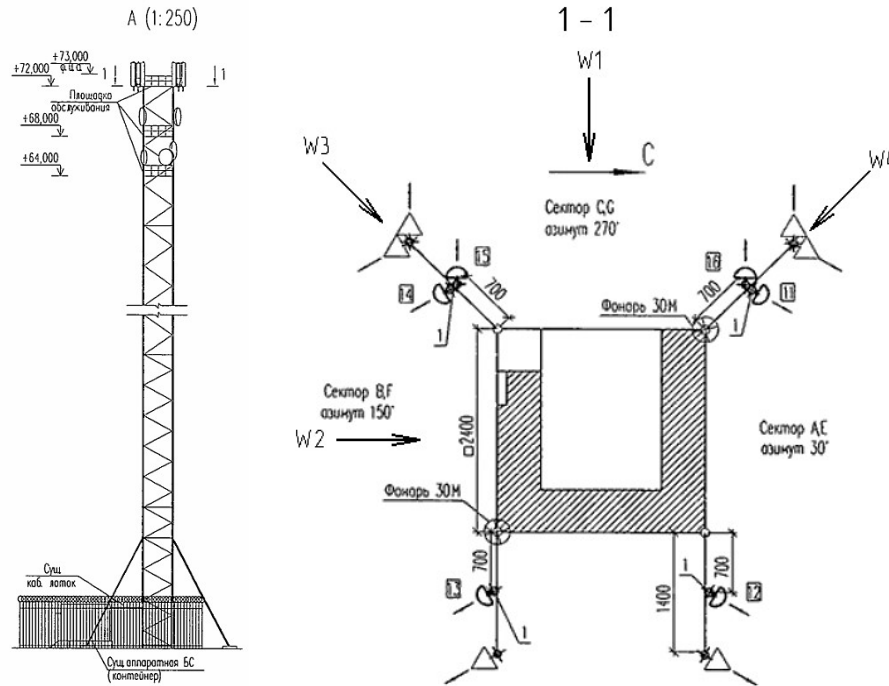


Рис. 2. Рассматриваемые направления атаки ветра
Fig. 2. Wind attack directions

ченной на основе формулы (11.2) СП 20.13330.2016 для средней ветровой нагрузки w_m , с последующим переходом к сосредоточенной силе через площадь элемента и с применением коэффициента надежности $\gamma_f = 1,4$:

$$F = \gamma_f \cdot w_0 \cdot k \cdot c_x \cdot A_i \quad (1)$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления, определяемое по табл. 11.1 СП 20.13330.2016; k — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, принимаемый по табл. 11.2 СП 20.13330.2016; c_x — аэродинамический коэффициент; A_i — наветренная площадь антенны.

Аэродинамический коэффициент лобового сопротивления $c_x = 1,4$ для всех типов антенного оборудования, независимо от его геометрической формы, конструктивного исполнения или назначения, в соответствии с Прил. В.1.13 свода правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», подлежит принятию в расчётах по нормативному значению, установленному для призматических сооружений и конструктивных элементов, а именно $c_x = 1,4$.

Данное значение рассматривается как универсальный нормативный показатель, применяемый в целях обеспечения достаточного запаса прочности и безопасности при проектировании несущих конструкций антенно-мачтовых сооружений. Однако многочисленные экспериментальные и численные теоретические исследования [13–16], посвящённые уточнению аэродинамических характеристик тел различной обтекаемой формы, демонстрируют, что для большинства современных приёмо-передающих антенн коэффициент аэродинамического сопротивления может быть существенно ниже. Это объясняется наличием конструктивных скруглений, изгибов и иных элементов, способствующих снижению турбулентности потока и, как следствие, уменьшению сопротивления воздуха при воздействии ветровой нагрузки.

Несмотря на полученные в научной среде данные, подтверждающие избыточность нормативного значения $c_x = 1,4$ для ряда типовых антенн, нормативно-методическая база РФ на текущем этапе развития требует применения именно этого значения в расчётах на ветровое воздействие. Следовательно, при расчёте несущей способности и оценке напряжённо-деформированного состояния конструкций антенно-мачтовых сооружений следует опираться исключительно на положения СП 20.13330.2016, что обеспечивает нормативную корректность и правоту расчётной модели.

Таким образом, в рамках данного исследования, несмотря на существующие основания для снижения расчетного значения аэродинамического коэффициента сопротивления с учетом реальной формы антенн и во избежание отклонений от требований нормативных документов, для всех рассматриваемых видов антенн был принят коэффициент $c_x = 1,4$. Это позволяет сохранить соответствие действующим строительным нормам и обеспечить достоверность полученных расчётных результатов при моделировании ветрового воздействия. Перечень антенн и радиомодулей, установленных и планируемых к установке на рассматриваемой опоре, а также сбор ветровой нагрузки на оборудование приведен в табл. 1.

Ветровая нагрузка на трубостойки, ограждения площадок и прочие конструкции задавалась отдельно на конечные элементы расчётной модели сосредоточенными силами в зависимости от профиля и высоты их расположения.

В соответствии с СП 20.13330.2016 аэродинамические коэффициенты пространственных ферм и решетчатых башен следует определять по формуле:

$$c_i = c_x \cdot (1 + \eta) \cdot k_i \quad (2)$$

где c_x и η определяются по Прил. В.1.15; в соответствии с таблицей В.9 значения коэффициента k_i

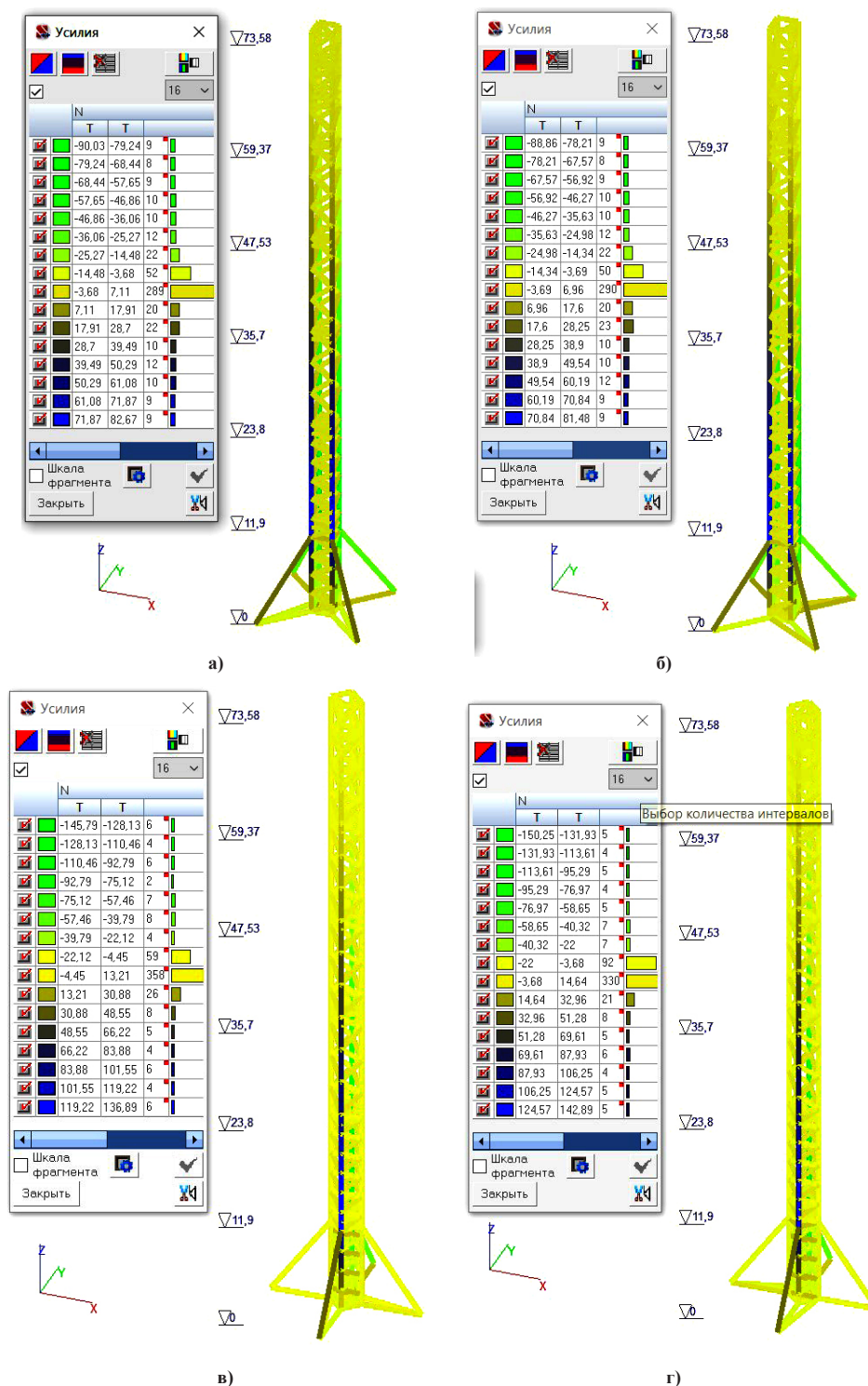


Рис. 3. Продольные усилия в элементах башни при направлении ветра:
а — W1; б — W2; в — W3; г — W4
Fig. 3. Longitudinal forces of the tower elements by the wind direction:
а — W1; б — W2; в — W3; г — W4

при направлении ветра в грань конструкции необходимо принимать равным 1, а при направлении ветра в ребро — 1,2.

Все расчёты проведены с использованием программного комплекса SCAD Office. Тип расчётной схемы — 5, тип конечного элемента — 5. Создано 230 узлов и 513 элементов, использовано 11 типов жесткости.

Результаты и обсуждения

По результатам анализа наиболее опасными направлениями атаки ветра являются показанные

на рис. 2 направления W1–W4. Значения коэффициента k_1 при направлении ветра W1 и W2 по СП 20.13330.2016 — 1, при направлении ветра W3 и W4 — 1,2.

Цветовая индикация значений продольных усилий в элементах башни по 16 интервалам при направлениях ветра W1–W4 представлена на рис. 3.

Распределение количества элементов конструкции, для которых определенное направление ветра (W1, W2, W3, W4) является расчётным, представлено на рис. 4. При ветровом воздействии в направлении W1 наибольшую нагрузку воспринимают именно



Рис. 4. Распределение количества элементов конструкции, для которых определенное направление ветра (W1, W2, W3, W4) является расчётным
 Fig. 4. Distribution of the number of structural elements for which a certain wind direction (W1, W2, W3, W4) is calculated

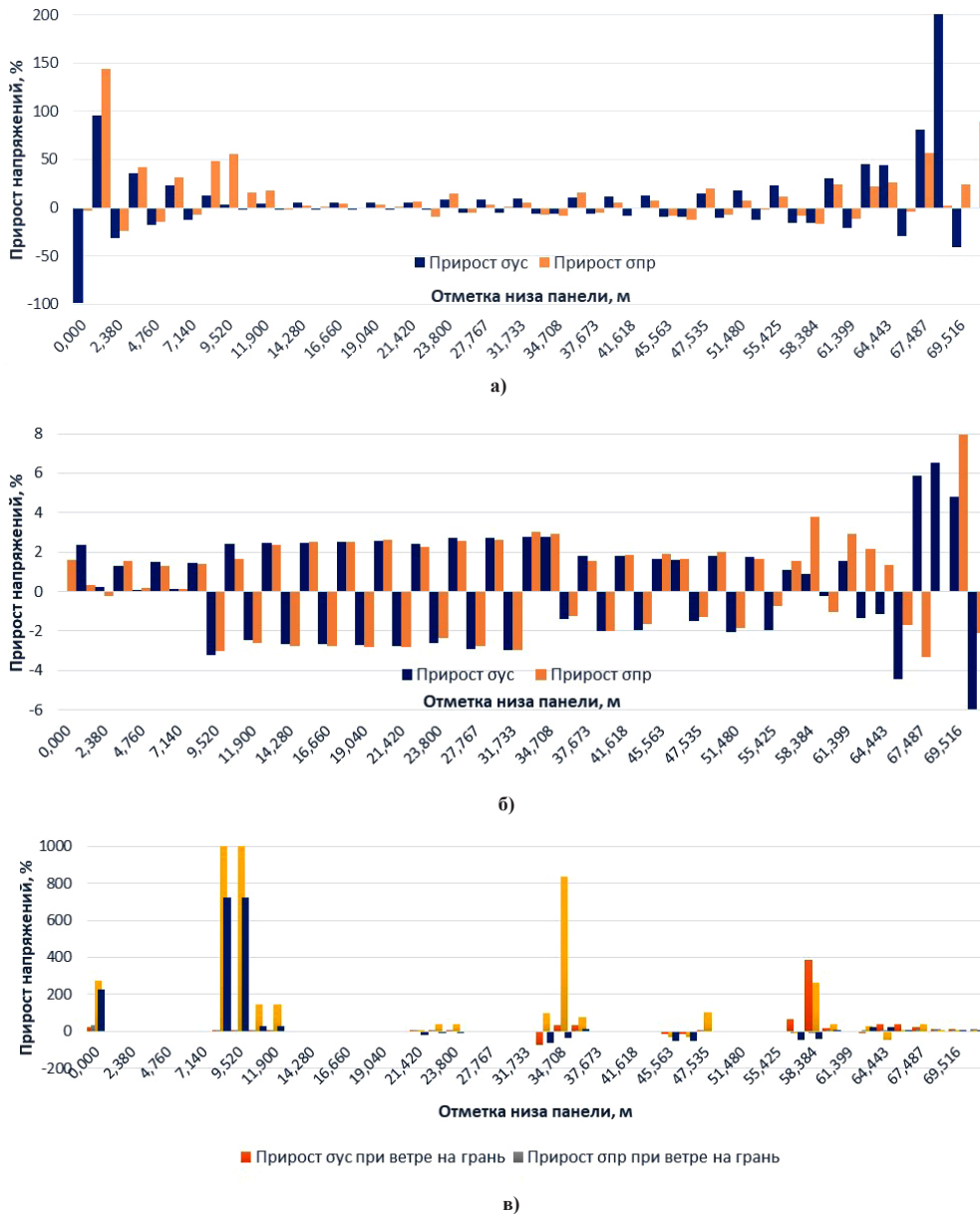


Рис. 5. Прирост максимальных напряжений: а — в элементах поясов при действии ветра в ребро; б — в элементах раскосов при действии ветра на грань; в — в элементах распорок
 Fig. 5. Increase of maximum stresses: а — in belts elements when the wind acts on the edge; б — in braces elements when the wind acts on the edge; в — in struts elements

раскосы и частично распорки, тогда как для поясов оно не критично. Направление W2 влияет только на раскосы, причём в гораздо меньшей степени, чем W1. При W3 и W4 нагрузка перераспределяется на пояса, что соответствует перпендикулярному воздействию ветра к длинной стороне башни; также заметна роль распорок. Таким образом, W1 кри-

тически для раскосов, W3 и W4 критичны для поясов, W2 — наименее критичное направление. Распорки активно участвуют в восприятии усилий при W1, W3 и W4, не участвуют — при W2. График подчёркивает необходимость учитывать индивидуальные направления ветра для точного анализа несущей способности различных элементов конструкции.



Рис. 6. Коэффициенты использования элементов конструкции
Fig. 6. Efficiency coefficients of structural elements

Результаты вычисления прироста максимальных напряжений при проверке на устойчивость σ_{yc} и прочность $\sigma_{\text{пр}}$ в элементах поясов при действии ветра в ребро; в элементах раскосов при действии ветра в ребро; в элементах распорок при действии ветра на грань и в ребро представлены на рис. 5. В процессе расчёта прироста сжимающих усилий в процентном соотношении в качестве базовых значений (100 %) использовались напряжения, полученные при наиболее опасных для конструкции направлениях ветра: на грань — W1, в ребро — W4. График, представленный на рис. 5а, показывает значительный разброс прироста напряжений элементов пояса в зависимости от высоты башни: с резким увеличением в нижней части конструкции (до 150 % и более) и в зоне отметки 69,5 м. Это свидетельствует о высокой чувствительности элементов поясов к направлению ветра W1. Приросты напряжений в элементах раскосов (рис. 5б) имеют умеренные значения (в пределах $\pm 10\%$), при этом наблюдается более равномерное распределение по высоте. Максимальные значения отмечаются в верхней трети конструкции (отметки от 61,9 до 69,5 м), что связано с направлением ветра на грань. Этот тип воздействия вызывает дополнительное изгибающее усилие в раскосах, однако характер изменения напряжений остается предсказуемым. Наиболее ярко выраженные пиковые приросты напряжений в распорках (рис. 5в) наблюдаются в зоне 9,5–11,9 м (до 100 %), а также на отметках 31,7 и 58,3 м. Эти участки демонстрируют аномальное поведение, предположительно, из-за неравномерного расположения оборудования.

На рис. 6 показан график коэффициентов использования элементов конструкции по типам (пояса, раскосы, распорки) в зависимости от высоты АМС. Коэффициент использования для некоторых элементов превышает 1. Наиболее критичные значения: на отметке 0,0 м — высокие значения для распорок (более 3,0); в диапазоне 9,52–11,9 м — как пояса, так и распорки работают с максимальными перегрузками (около 3,0); от 28 до 42 м — устойчивое превышение 1,0 у поясов. Требуется усиление элементов в нижней и средней частях конструкции.

Для всей конструкции наиболее опасными направлениями ветра являются на грань — W1, в ребро — W4. Такой вывод сделан на основании полученных максимальных значений продольных усилий и прироста напряжений в элементах, он

также подтверждается анализом перемещений конструкции. При действии ветра W1 в наибольшей степени нагружаются раскосы и распорки (рис. 3а, 4), что приводит к локальному росту напряжений, более чем на 150 % в нижней части башни (рис. 5б, 5в). При воздействии ветра W4 критически нагруженными оказываются пояса (рис. 3г, 4), для которых фиксируются значительный прирост напряжений и превышение коэффициента использования выше 1,0 в диапазоне высот от 9,52 до 47,6 м (рис. 5а, 6). Таким образом, именно направления W1 и W4 формируют наибольшие расчетные усилия и деформации в несущих элементах башни, что позволяет квалифицировать их как наиболее опасные для всей конструкции.

Анализ напряженно-деформированного состояния несущих конструкций металлической башни высотой 72 м по результатам расчета несущей способности опоры показал, что несущая способность металлоконструкций опоры не соответствует требованиям СП 16.13330.2017. Напряжения в элементах башни превышают значения расчетного сопротивления.

Инженерные расчёты в программных комплексах, таких как SCAD и их аналогах, требуют индивидуальной проверки несущей способности каждого элемента в рамках каждой из расчётных схем. Результаты при этом формируются отдельно для каждой конфигурации, что повышает трудоёмкость обработки данных и анализа результатов. Подбор сечений осуществляется по результатам каждой схемы в отдельности, что приводит к существенным затратам времени и ресурсов.

Дополнительную сложность представляет процесс задания даже одного варианта ветрового нагружения для высотной решётчатой конструкции. При увеличении количества нагружений до четырёх и более возрастает не только трудоёмкость подготовки исходных данных, но и длительность численного расчёта. Одним из возможных решений может быть применение нескольких различно ориентированных относительно ветровой нагрузки расчётных моделей вместо создания большого числа вариантов нагрузок в рамках одной схемы. Такой подход позволяет упростить этап задания нагрузок, однако значительно увеличивает количество вычислений и, как следствие, объём выходных данных, подлежащих анализу. Расчётная модель АМС может включать сотни и даже тысячи элементов. Для каждо-

го из них определяется полный набор внутренних усилий (обычно шесть компонентов), по которым осуществляется большое количество нормативных проверок в соответствии с действующими строительными нормами. В результате объём выходных данных может достигать чрезвычайно высоких значений, что требует от инженера высокой квалификации и автоматизации процессов анализа.

Заключение

Несмотря на то, что нормативная и учебная литература не регламентирует учет расположения технологического оборудования при выборе расчетных направлений ветра, для цифровой модели башни сотовой связи в процессе выбора расчетного направления ветра необходимо учитывать пространственное расположение всех элементов конструкции и оборудования. Простое рассмотрение воздействия ветра с одного-двух направлений в зависимости от контура поперечного сечения башни по СП 20.13330.2016 не обеспечивает необходимой полноты анализа. Решение о количестве и ориентации расчётных схем должно приниматься индивидуально на основании инженерного анализа. Важно учитывать как геометрию самой конструкции, так и пространственное размещение существующего и проектируемого оборудования. Индивидуальный подход к выбору схем нагружения является необходимым условием обеспечения надёжности и безопасности проектируемого объекта.

Благодарности / Acknowledgments

Автор выражает благодарность рецензенту, чья критическая оценка представленных материалов способствовала повышению качества статьи.

The author expresses gratitude to the reviewer whose critical assessment of the submitted materials significantly improved the quality of the article.

Список источников / References

1. Белаш Т. А., Сафин Р. Р. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них // Вестник НИЦ «Строительство». 2024. № 41 (2). С. 18–28. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28. EDN: CQQMAP.
2. Belash T. A., Safin R. R. Modelirovaniye vetrovoy nagruzki dlya analiza aerodinamiki opor dvoynogo naznacheniya s antennami, ustanovlennymi na nikh [Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics]. Vestnik NITs «Stroitel'stvo». *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024. No. 41 (2). P. 18–28. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28. EDN: CQQMAP. (In Russ.).
3. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-supporting telecommunication towers. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 18, no. 6. P. 911–927.
4. 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.
5. Sabitov L. S., Mailyan L. R., Yaziev S. B. [et al.]. Stress-strain state of the "combined tower-reinforced-concrete foundation-foundation soil" system for high-rise structures. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. 02035. DOI: 10.1051/e3sconf/202016402035.
6. Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R. N. Structural assessment of a lattice tower for a small multi-bladed wind turbine. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 8 (4). P. 343–358. DOI: 10.1007/s40095-017-0247-6.
7. Zhang Q., Fu X., Lai T., Ren L. Wind load identification of lattice towers using multi-source heterogeneous monitoring data // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 236 (11). Article 105402. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105402.
8. Hadane A., Redford J. A., Gueguin M. [et al.]. CFD wind tunnel investigation for wind loading on angle members in lattice tower structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 236 (11). 105397. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105397.
9. Liu M., Wu S., Guan W., Zhang C. [et al.]. Wind loads on square lattice towers with tubular members based on wind tunnel test and numerical simulation. *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36, no. 12. 127129. DOI: 10.1063/5.0243306.
10. Маркина Ю. Д. Автоматизация сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22, № 9. С. 23–30. DOI: 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030. EDN: UQDTZQ.
11. Markina Yu. D. Avtomatizatsiya sbora staticheskoy sostavlyayushchey vetrovoy nagruzki na reshetchatuyu bashnyu [Automated collection of the static component of wind load on lattice towers]. Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2025. Vol. 22, no. 9. P. 23–30. DOI: 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030. EDN: UQDTZQ. (In Russ.).
12. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: Изд-во литературы по строительству, 1972. 111 с.
13. Savitski, G. A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind loading on structures]. Moscow, 1972. 111 p. (In Russ.).
14. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко. Москва: Стройиздат, 1978. 216 с.
15. Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystviye vetra [Guide to wind resistance analysis of buildings and structures] / TsNIISK imeni V. A. Kucherenko [CRIBS named after V. A. Kucherenko]. Moscow, 1978. 216 p. (In Russ.).
16. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействия ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецовой; под ред. Б. Е. Маслова. Москва: Стройиздат, 1984. 360 с.
17. Simiu E., Scanlan R. Vozdeystviya vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind effects on structures] / trans. from Engl. B. E. Maslov, A. V. Shvetsova; ed. by B. E. Maslov. Moscow, 1984. 360 p. (In Russ.).
18. Иоскевич А. В., Савченко А. В., Егорова Е. С., Иоскевич В. В. Понижающий коэффициент ветрового давления и его учет при расчете решетчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 45–57. EDN: UISIAF.
19. Ioskevich A. V., Savchenko A. V., Egorova E. S., Ioskevich V. V. Ponizhayushchiy koeffitsiyent vetrovogo davleniya i ego uchet pri raschete reshetchatykh konstruksiy [The impact of the reduction factor of wind force coefficient to lattice structures]. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. No. 4 (31). P. 45–57. EDN: UISIAF. (In Russ.).
20. 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. 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202345502021.
21. Трянина, Н. Ю., Облетов Е. Н., Самохвалов И. А. Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций // Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 23–30. EDN: NGWFXK.
22. Tryanina, N. Yu., Obletov E. N., Samokhvalov I. A. Aerodinamicheskoye vozdeystviye na panel'nyye anteny bazovykh stantsiy [Aerodynamic impact on panel antennas of base stations]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2022. No. 1 (61). P. 23–30. EDN: NGWFXK. (In Russ.).

16. Jia Y., Huanget J., Liual Q. [et al.]. Analysis of the influence of antenna arrangement on the wind load of telecommunication towers. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (6). 2538. DOI: 10.3390/app14062538.

МАРКИНА Юлия Дмитриевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Теория сооружений и технической механики» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, г. Нижний Новгород.
SPIN-код: 4203-4240
AuthorID (РИНЦ): 1229730
ORCID: 0009-0006-7167-0652
Адрес для переписки: poluektoff@bk.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 10.11.2025.

MARKINA Yuliya Dmitriyevna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Theory of Structures and Technical Mechanics Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod.
SPIN-code: 4203-4240
AuthorID (RSCI): 1229730
ORCID: 0009-0006-7167-0652
Correspondence address: poluektoff@bk.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 06.11.2025; accepted for publication 10.11.2025.