

Расчетные направления ветра при экспертизе несущей способности трехгранных антенно-мачтовых сооружений

Ю.Д. Маркина^{ID}

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

✉ poluektoff@bk.ru

Поступила в редакцию: 11 июня 2025 г.

Доработана: 1 августа 2025 г.

Принята к публикации: 5 августа 2025 г.

Аннотация. Рассмотрено влияние направления ветровой нагрузки на напряженно-деформированное состояние трехгранных решетчатых антенно-мачтовых сооружений высотой от 40 до 72 м. Объектами исследования выступают пять реально эксплуатируемых металлических башен различной геометрии, установленных в различных областях Российской Федерации. Расчеты выполнены методом конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса SCAD Office. В рамках исследования проведено сравнение усилий в элементах конструкций (поясах, раскосах, распорках) при действии ветра в двух направлениях: нормативном (перпендикулярно наветренной грани башни) и вдоль одной из граней, не предусмотренном национальными нормативами. Установлено, что при воздействии ветра вдоль грани в ряде случаев возникают усилия, превышающие значения при направлении перпендикулярно наветренной грани башни на 20–60 % и более. Зафиксированы характерные изменения в распределении усилий по высоте и наличие пространственного закручивания конструкции. Полученные данные подтверждают необходимость расширения расчетных сценариев для башенных сооружений и учитывать направления ветрового воздействия, ранее не рассматриваемые в инженерной практике. Представленные результаты восполняют пробел в научной литературе и могут быть использованы для совершенствования нормативной базы и методов проектирования решетчатых антенно-мачтовых сооружений.

Ключевые слова: АМС, МКЭ, НДС, РНС, ветровая нагрузка, опора сотовой связи, стальная башня, трехгранная решетчатая конструкция, нормы проектирования

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

Для цитирования: 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. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345>

Design Wind Directions in Bearing Capacity Assessment of Triangular Antenna-Mast Structures

Yulia D. Markina^{ID}

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

✉ poluektoff@bk.ru

Received: June 11, 2025

Revised: August 1, 2025

Accepted: August 5, 2025

Abstract. The influence of wind direction on the stress-strain state of triangular lattice antenna-mast structures with heights ranging from 40 to 72 meters is examined. The study focuses on five real-world steel towers of varying geometries, located in the Kaluga, Tula, and Ryazan Regions of the Russian Federation. Structural analysis was performed using the finite element method in

Маркина Юлия Дмитриевна, старший преподаватель кафедры теории сооружений и технической механики, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), 603000, Российская Федерация, 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., 2025

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

the SCAD Office software environment. The investigation involved pairwise comparisons of internal forces in key structural elements (chords, diagonals, and horizontal braces) under two wind directions: the standard (perpendicular to the windward face of the tower) and along one of the faces, which is not considered in national design codes. It was found that wind acting along a tower face can, in several cases, induce internal forces that exceed those under the standard direction by 20–60%. Distinct patterns of force redistribution along the tower height and spatial torsional effects were also observed. The results demonstrate the necessity of expanding design scenarios for tower structures to include non-standard wind directions, which are currently overlooked in engineering practice. This study fills a research gap and contributes to the development of improved design methods and regulatory frameworks for lattice antenna-mast structures.

Keywords: antenna-mast structures, FEM, stress-strain state, calculation of bearing capacity, wind load, cellular communication support, steel tower, triangular lattice structure, design standards

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

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

1. Введение

Научно-технический прогресс формирует направления развития всех сфер деятельности человеческого общества. Появление телевидения и сотовой связи потребовало массового строительства высотных башен для размещения, передающего и ретранслирующего оборудования. Необходимость обеспечения покрытия услугами на обширных территориях поставила перед наукой и практикой задачу разработки универсальных конструкций, которые эффективно функционировали бы в различных природно-климатических условиях. Большая высота антенно-мачтовых сооружений делает их в значительной степени чувствительными к воздействию ветровой нагрузки. Аэродинамике и ветровому воздействию на решетчатые башенные конструкции посвящено множество исследований [1–6], в которых рассматриваются как экспериментальные методы (в аэродинамической трубе), так и численное моделирование на идеализированных геометриях. Однако в подавляющем большинстве таких работ анализ проводится при нормативном направлении ветра — перпендикулярно наветренной грани конструкции, что соответствует требованиям Свода правил Российской Федерации СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*»¹.

Наибольшее распространение среди АМС имеют трехгранные и четырехгранные конструкции [7–9], при этом трехгранные конструкции являются более экономичными. По ряду источников² [10; 11], масса четырехгранной башни превышает массу трехгранной на 10–15 %, а шестигранной — на 20 %, что делает трехгранные АМС наиболее привлекательными при массовом строительстве. В соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 значение ветровой нагрузки для расчета несущей способности элементов АМС необходимо определять при направлении ветрового потока W1, показанного на рис. 1. При заданном направлении атаки ветра ветровая нагрузка действует перпендикулярно наветренной грани башни, вызывая максимальные сжимающие усилия в ее подветренном поясе. В отличие от растяжения, сжатие пояса может привести к потере устойчивости, что особенно опасно, поскольку потеря устойчивости происходит внезапно и при нагрузках, существенно ниже предельных прочностных значений. Таким образом, направление ветра W1 может являться критическим при проверке несущей способности поясов АМС. При этом максимальные сжимающие усилия в элементах решетки конструкции должны возникать при действии ветра вдоль одной из граней W2,

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. 154 с.

² ENV 1993-1-3 EuroCode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold formed thin gagemembers and sheeting. European Committee for Standardisation CEN. Brussels, 1996; Wind Actions on Structures: ISO 4354:2009. [2009-06-04]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2009. 68 p.

что не учитывается в нормативной и учебной литературе³. В данной статье приведены результаты определения усилий в элементах пяти трехгранных АМС, расположенных в различных областях России, при направлениях ветра перпендикулярно грани (W1) и вдоль грани (W2).

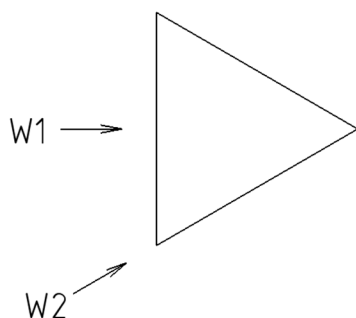


Рис. 1. Рассматриваемые направления ветра по отношению к конструкции: W1 — перпендикулярно наветренной грани; W2 — вдоль грани
Источник: выполнено Ю.Д. Маркиной

Figure 1. The wind directions considered in relation to the structure are:
W1 — perpendicular to the windward face;
W2 — along the face
Source: made by Yu.D. Markina

Современные исследования в области аэродинамики решетчатых башенных сооружений сосредоточены преимущественно на воздействии ветра, направленного перпендикулярно наветренной грани конструкции [12–14]. В [15–17] отмечается, что при отклонении направления ветра от нормативного могут возникать дополнительные усилия, однако такие сценарии рассматриваются либо на упрощенных моделях, либо без учета реальной геометрии объектов. В отечественной нормативной базе расчет на нестандартные направления ветрового воздействия, в том числе вдоль одной из граней (направление W2), не регламентируется. Таким образом, выявляется недостаточность комплексных численных исследований, охватывающих реальные антенно-мачтовые сооружения, с целью оценки влияния направления ветра на напряженно-деформированное состояние. Указанное обстоятельство позволяет сформулировать исследовательскую лакуну, на восполнение которой направлена настоящая работа.

Объектами исследования являются типовые трехгранные антенно-мачтовые сооружения высотой от 40 до 72 м, представляющие собой решетчатые пространственные конструкции, эксплуатируемые в различных регионах Российской Федерации.

Цель исследования — количественная оценка влияния направления ветрового воздействия на продольные усилия в основных элементах решетчатых башен, с акцентом на анализ нестандартного направления вдоль грани (W2), не учитываемого действующими нормативами.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) формирование расчетных моделей пяти реально эксплуатируемых башенных конструкций различной высоты и конфигурации;
- 2) проведение численного моделирования ветрового воздействия в двух направлениях: нормативном (W1) и вдоль грани (W2);
- 3) анализ полученных усилий в поясах, раскосах и распорках конструкций;
- 4) сравнение результатов с ранее опубликованными данными;
- 5) формулирование инженерных выводов, направленных на совершенствование расчетных подходов при проектировании АМС.

2. Методы

Объекты исследования:

АМС1 (рис. 2, а) высотой 72 м — расположена в Рязанской области Российской Федерации. Внешняя форма башни до отм. +48,000 — трехгранная усеченная пирамида; с отм. +48,000 до отм. +72,000 — трехгранная призма. В основании башня имеет базу 9,50 м; на отм. +12,000 — 6 м и на отм. +48,000 — 2,75 м. Башня состоит из 6 секций высотой 12,0 м. Секции состоят из отдельных элементов с креплением на болтах. Пояса изготовлены из бесшовных горячедеформированных труб,

³ Actions on Structures. Part 1–4. General actions. Wind Actions: Eurocode 1. Brussels, Belgium: CEN, 2004. 155 p.; Design of Steel Structures. Part 3–1. Towers, masts and Chimneys. Towers and Masts: Eurocode 3. Brussels, Belgium: CEN, 2006. 79 p.; Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7-05. [2006-01-01]. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers. 419 p.

а решетка — из бесшовных горячедеформированных труб и равнополочных гнутых швеллеров. Соединения поясов — болтовое на фланцах. Крепление раскосов и распорок к поясам — болтовое через фасонки.

АМС2 (рис. 2, б) высотой 70 м — расположена в Тульской области Российской Федерации. Башня представляет собой пространственную стержневую конструкцию, имеющую внешнюю форму в виде трехгранной усеченной пирамиды до отм. 49,726 м и в виде трехгранной призмы между отметками 49,726 м — 70,000 м. Башня состоит из 11 секций различной высоты. Элементы конструкции башни запроектированы из бесшовных горячедеформированных труб, стальных горячекатаных равнополочных уголков, стального горячекатаного круглого проката.

АМС3 (рис. 2, в) высотой 67,5 м — расположена в Калужской области Российской Федерации. Вид решетчатой конструкции с отметки 0,000 — трехгранная усеченная пирамида, с отметки +52,500 — трехгранная призма. Пояса, раскосы и трубы выполнены из горячедеформированных бесшовных труб по Государственному стандарту ГОСТ 8732-78⁴, действующему на территории РФ. Башня включает 9 секций высотой 7,5 м. Секции состоят из отдельных элементов с креплением на болтах. Соединение отдельных секций между собой осуществляется посредством фланцев на высокопрочных болтах.

АМС4 (рис. 2, г) высотой 72,5 м — находится в Калужской области Российской Федерации. Внешняя форма башни до отм. +60,000 м — трехгранная усеченная пирамида; с отм. +60,000 м и выше — трехгранная призма. В основании башня имеет базу 8,5 м и на отм. +60,000 м — 3,0 м. Башня состоит из 9 секций высотой 7,5 м и одной — 5,0 м. Пояса, раскосы и трубы выполнены из горячедеформированных бесшовных труб.

АМС5 (рис. 2, д) высотой 40 м — расположена в Калужской области Российской Федерации. Башня высотой 40,0 м состоит из четырех унифицированных секций длиной 10,0 м. Верхняя секция SC-1 — треугольная в плане со стороной равностороннего треугольника, равного 1,5 м. Остальные секции — усеченная пирамида треугольного сечения, с уклоном поясов 2,1° и нижняя SC-4 с уклоном поясов 13°. Пояса секций изготовлены из круглых труб, решетка башни из квадратных труб. Соединения поясов — фланцевые на болтах. Крепление раскосов из квадратных труб к поясам — болтовое.

Все расчеты выполнены в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

В качестве расчетной схемы каждой из опор принята пространственная стержневая статически неопределимая система. Расчеты выполнены в ПК SCAD Office. Расчетные схемы (РС) — системы общего вида (признак 5), конечные элементы — пространственные стержни (тип 5). Краткие характеристики РС АМС сведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики РС АМС / Characteristics of AMS models

№ АМС / No. АМС	1	2	3	4	5
Общее количество элементов / Total number of elements	327	366	315	327	306
Общее количество узлов / Total number of nodes	117	138	111	114	117
Количество типов жесткости / Number of types of stiffness	8	8	12	9	7

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

Учтены следующие постоянные нагрузки:

- собственный вес конструкций;
- вес оборудования;

⁴ ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Министерство черной металлургии СССР. 1988. 29 с.



Рис. 2. Общий вид объектов исследования:
a — AMC1; *б* — AMC2; *в* — AMC3; *г* — AMC4; *д* — AMC5
 Источник: выполнено А.А. Маркиным

Figure 2. General view of the research objects:
a — AMS1; *б* — AMS2; *в* — AMS3; *г* — AMS4; *д* — AMS5
 Source: made by A.A. Markin

Учтены временные нагрузки:

- гололедная нагрузка;
- статическая составляющая ветра;
- динамическая составляющая ветра.

Расчеты выполнены для следующих основных сочетаний нагрузок:

- 100 % ветровая нагрузка + нагрузка от собственного веса конструкций опоры и оборудования;
- 25 % ветровая нагрузка на покрытые гололедом элементы башни и кабельной трассы + 60 % ветровая нагрузка на покрытые гололедом остальные элементы + нагрузка от собственного веса конструкций опоры и оборудования + гололедная нагрузка.

Расчетным сочетанием при определении усилий в элементах каждой опоры является сочетание — 100 % ветровая нагрузка + нагрузка от собственного веса конструкций опоры, оборудования и кабелей.

3. Результаты и обсуждение

Результаты определения максимальных величин сжимающих усилий $N_{\max}$ от расчетных комбинаций загружений при направлениях ветра перпендикулярно грани W1 и вдоль грани W2 (см. рис. 1) в элементах решетки AMC1 и AMC2 для каждой панели приведены в табл. 2. Результаты определения величин продольных усилий во всех элементах конструкций приведены на рис. 3.

Таблица 2 / Table 2

Максимальные значения сжимающих усилий от расчетных комбинаций
загружений в элементах решетки AMC1 и AMC2 /
The maximum values of compressive forces from the design combinations
of loads in the lattice elements of AMS1 and AMS2

Отм. низа / Height of the lower point	AMS1						AMS2						
	Раскосы / Braces			Распорки / Spacers			Отм. низа / Height of the lower point	Раскосы / Braces			Распорки / Spacers		
	$N_{\max}$ (т) при напр. ветра (см. рис. 1) / $N_{\max}$ (t) in the wind direction (see Figure 1)		Прирост $N_{\max}$ / Increase in $N_{\max}$, %	$N_{\max}$ (т) при напр. ветра (см. рис. 1) / $N_{\max}$ (t) in the wind direction (see Figure 1)		Прирост $N_{\max}$ / Increase in $N_{\max}$, %		$N_{\max}$ (т) при напр. ветра (см. рис. 1) / $N_{\max}$ (t) in the wind direction (see Figure 1)		Прирост $N_{\max}$ / Increase in $N_{\max}$, %	$N_{\max}$ (т) при напр. ветра (см. рис. 1) / $N_{\max}$ (t) in the wind direction (see Figure 1)		Прирост $N_{\max}$ / Increase in $N_{\max}$, %
	W1	W2		W1	W2			W1	W2		W1	W2	
0,000	8,22	10,30	25	0,00	0,00	0	0,000	2,45	2,79	14	0,00	0,00	0
3,000	8,65	10,58	22	0,01	0,04	300	3,911	2,21	2,58	17	1,01	1,17	15
6,000	9,43	10,28	9	0,01	0,04	300	7,821	2,25	2,47	10	1,01	1,17	15
9,000	9,83	10,59	8	4,44	4,74	7	10,814	1,93	2,26	17	0,97	1,17	21
12,000	9,73	10,96	13	4,44	4,74	7	13,807	1,36	1,56	14	1,07	1,21	14
15,000	9,14	10,47	15	0,26	0,40	51	16,801	1,44	1,63	14	1,07	1,21	14
18,000	8,73	10,02	15	0,26	0,40	51	19,794	1,32	1,53	17	0,92	1,08	18
21,000	7,77	9,56	23	3,50	5,58	59	22,787	1,38	1,60	16	0,88	1,03	18
24,000	9,70	10,07	4	3,50	5,58	59	25,780	1,36	1,55	14	0,88	1,03	18
27,000	8,76	9,44	8	0,54	0,48	−11	28,774	1,44	1,63	14	0,89	0,95	6
30,000	8,39	9,08	8	0,54	0,48	−11	31,767	1,30	1,54	18	0,80	0,95	19
33,000	7,43	8,54	15	2,69	1,76	−34	34,760	1,28	1,47	14	0,76	0,92	22
36,000	3,63	4,26	17	2,69	3,03	13	37,753	1,24	1,49	20	0,69	0,82	19
39,000	3,05	3,52	15	2,62	3,03	15	40,746	1,25	1,42	14	0,65	0,80	23
42,000	3,12	3,59	15	2,21	2,60	18	43,740	1,18	1,37	16	0,54	0,65	22
45,000	3,12	3,59	15	3,21	2,30	−28	46,733	1,28	1,50	17	1,84	1,68	−9
48,000	6,02	6,87	14	3,21	2,30	−28	49,726	3,19	3,66	15	1,95	2,26	16
52,000	5,43	6,23	15	3,24	3,70	14	52,726	2,97	3,43	15	1,95	2,26	16
56,000	4,79	5,50	15	2,52	2,82	12	55,726	2,31	2,64	14	1,71	1,96	15
60,000	3,97	4,56	15	2,52	2,82	12	58,726	1,86	2,12	14	1,34	1,53	14
64,000	2,72	3,14	16	1,98	2,17	10	61,726	1,89	2,16	14	1,10	1,21	10
68,000	1,29	1,50	16	0,24	1,31	448	65,900	0,67	0,78	15	0,84	0,78	−7

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

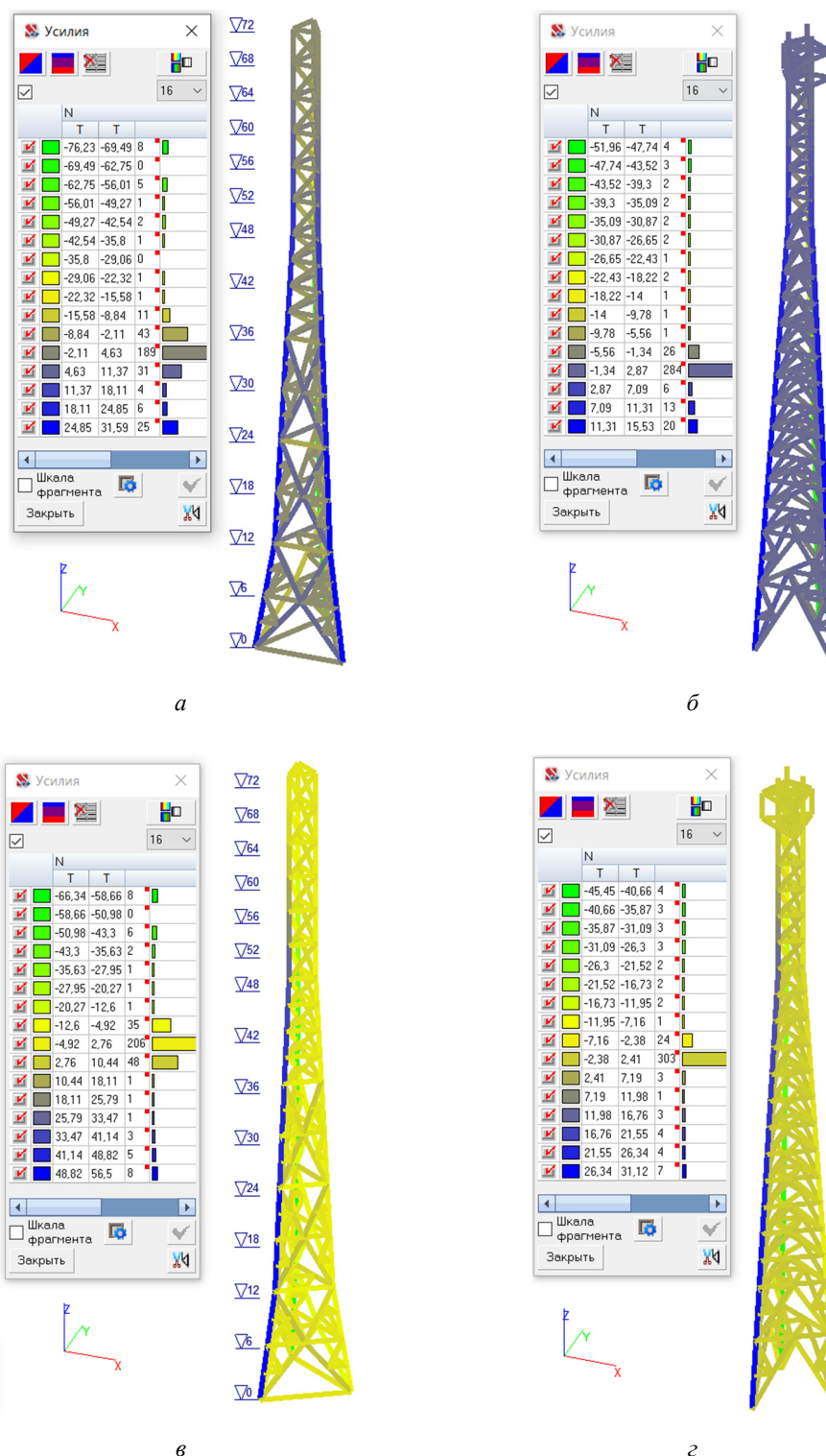


Рис. 3. Продольные усилия от расчетных комбинаций нагрузок в элементах:

а — AMC1 при действии ветра по направлению W1; б — AMC2 при действии ветра по направлению W1;
в — AMC1 при действии ветра по направлению W2; г — AMC2 при действии ветра по направлению W2

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

Figure 3. The longitudinal forces from the design combinations of loads in the elements:

а — AMS1 when the wind is acting in the direction W1; б — AMS2 when the wind is acting in the direction W1;
в — AMS1 when the wind is acting in the direction W2; г — AMS2 when the wind is acting in the direction W2

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

Величины усилий в элементах всех рассматриваемых башен сравнивались в абсолютных и относительных значениях. При вычислении прироста сжимающих усилий в процентном отношении за основу (100 %) принимались усилия в элементах АМС, полученные при направлении атаки ветра перпендикулярно W1 (см. рис. 1), что соответствует методике определения ветровой нагрузки СП 20.13330.2016. Максимальные усилия в поясах всех АМС получены при направлении атаки W1. Максимальные усилия в раскосах всех АМС получены при направлении атаки вдоль грани W2, они превышают усилия, возникающие от воздействия ветровой нагрузки, определяемой в соответствии с СП 20.13330.2016, в среднем на 20 %. Наименьшую предсказуемость показывают значения усилий в распорках АМС, прирост сжимающих усилий при направлении ветра W2 относительно направления ветра W1 варьируется в среднем от –50 до +60 %. Уровень прироста сжимающих усилий при изменении направления атаки ветра различен для каждого из объектов исследования и меняется в зависимости от высоты и типа рассматриваемого элемента решетки. Можно предположить, что он будет зависеть от геометрических параметров исследуемого объекта: типа решетки, размеров секций, сечений элементов и пр. Для более точных выводов данный аспект нуждается в дополнительных более тщательных исследованиях.

Результаты выборки максимальных величин сжимающих усилий в распорках и раскосах АМС3-АМС5 по секциям приведены в табл. 3. Результаты определения величин продольных усилий во всех элементах конструкций приведены и на рис. 4.

При этом для каждого объекта исследования тенденция изменения сжимающих усилий при переходе от направления ветра W1 к направлению W2 остается одинаковой: снижение максимальных продольных сил от расчетной комбинации загружений в элементах пояса, рост в раскосах и нестабильное поведение в распорках. Результаты исследования доказывают необходимость учета в расчете несущей способности АМС обоих направлений ветрового потока.

Таблица 3 / Table 3

**Максимальные величины сжимающих усилий от расчетных комбинаций
загружений в элементах решетки АМС3 — АМС5 /
The maximum values of compressive forces from the design combinations
of loads in the lattice elements of AMS3 — AMS5**

№ секции / Section number	АМС3						АМС4						АМС5					
	Раскосы (см. рис. 1) / Braces (see Figure 1)			Распорки (см. рис. 1) / Spacers (see Figure 1)			Раскосы / Braces		Распорки (см. рис. 1) / Spacers (see Figure 1)				Раскосы (см. рис. 1) / Braces (see Figure 1)		Распорки (см. рис. 1) / Spacers (see Figure 1)			
	$N_{max}(t)$ при напр. ветра / $N_{max}(t)$ in the wind direction		Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	$N_{max}(t)$ при напр. ветра / $N_{max}(t)$ in the wind direction		Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	$N_{max}(t)$ при напр. ветра / $N_{max}(t)$ in the wind direction		Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	$N_{max}(t)$ при напр. ветра / $N_{max}(t)$ in the wind direction		Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %	Прирост $N_{max} /$ Increase in N_{max} , %
	W1	W2		W1	W2		W1	W2					W1	W2				
1	1,90	1,94	2	0,13	0,17	31	4,05	4,22	4	1,33	1,71	29	3,39	3,46	2	1,5	1,25	–17
2	1,63	2,05	26	0,19	0,23	21	2,45	2,56	4	0,23	0,26	13	1,49	1,63	9	0,52	0,57	10
3	2,23	2,29	3	0,12	0,18	50	3,16	3,48	10	0,20	0,24	20	1,05	1,24	18	0,46	0,44	–4
4	1,75	2,16	23	0,11	0,16	45	2,48	2,61	5	0,69	0,18	–74	1,14	1,28	12	0,1	0,08	–20
5	2,05	2,15	5	0,16	0,19	19	2,36	2,45	4	0,07	0,13	86	–	–	–	–	–	–
6	1,85	2,12	15	0,17	0,10	–41	3,41	3,44	1	0,18	0,14	–22	–	–	–	–	–	–
7	2,53	2,71	7	0,24	0,22	–8	2,76	2,78	1	0,09	0,13	44	–	–	–	–	–	–
8	1,81	2,38	31	0,99	0,48	–52	1,75	2,07	18	0,91	0,13	–86	–	–	–	–	–	–
9	1,82	2,57	41	0,70	0,76	9	0,86	1,92	123	0,48	0,57	19	–	–	–	–	–	–
10							0,43	0,92	114	0,23	0,32	39	–	–	–	–	–	–

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

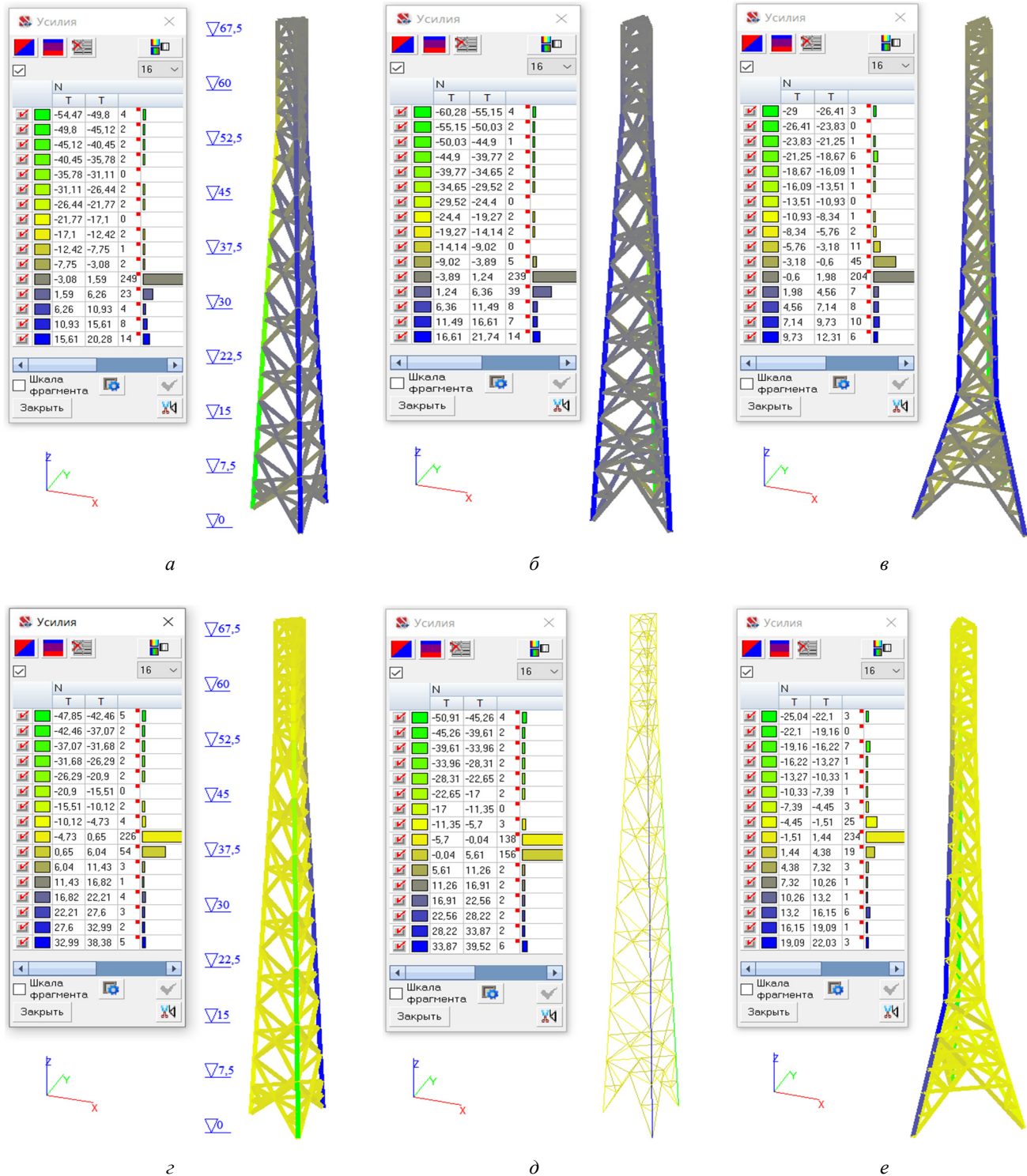


Рис. 4. Продольные усилия от расчетных комбинаций нагрузок в элементах:

a — AMC3 при действии ветра по направлению W1; *б* — AMC4 при действии ветра по направлению W1;
в — AMC5 при действии ветра по направлению W1; *г* — AMC3 при действии ветра по направлению W2;
д — AMC4 при действии ветра по направлению W2; *е* — AMC5 при действии ветра по направлению W2

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

Figure 4. The longitudinal forces from the design combinations of loads in the elements:

a — AMS3 when the wind is acting in the direction W1; *б* — AMS4 when the wind is acting in the direction W1;
в — AMS5 when the wind is acting in the direction W1; *г* — AMS3 when the wind is acting in the direction W2;
д — AMS4 when the wind is acting in the direction W2; *е* — AMS5 when the wind is acting in the direction W2

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

Значительные усилия в элементах решетки АМС, а также перемещения конструкций свидетельствуют о возникновении эффекта закручивания башен вследствие асимметричности по отношению к граням башни направления атаки ветра W2. Полученные результаты подтверждаются сопоставимостью с результатами анализа напряженно-деформированного состояния трехгранной стальной вытяжной башни, внутри которой расположен пакет из трех труб, при различных углах атаки ветра [18; 19].

Полученные значения продольных усилий и их вариации в зависимости от направления ветра сопоставимы с результатами, представленными в работах других авторов. Так, в [12; 13] показано, что при действии ветра под косым углом к фасетной поверхности решетчатой башни возможно увеличение усилий в отдельных элементах до 15–25 %. В [14; 16] также отмечено, что воздействие вдоль одной из граней приводит к перераспределению нагрузок и локальным концентрациям усилий.

Однако в настоящем исследовании впервые проведен системный анализ пяти реально существующих АМС, выполненный по единой методике, с учетом двух направлений ветрового воздействия (W1 — нормативного и W2 — вдоль грани). В отличие от [12; 14] в данной работе внимание акцентировано не только на абсолютных значениях усилий, но и на сравнительной опасности направления W2, которое в нормативной базе не учитывается.

Дополнительно подтвержден и количественно зафиксирован эффект торсионного скручивания башен при ветровом воздействии вдоль грани, что ранее упоминалось только качественно [16], без привязки к конкретным конструкциям. Таким образом, предложенный подход позволяет выявлять критические направления ветра, игнорируемые стандартными расчетами, и обосновывает необходимость их учета в инженерной практике.

Следует отметить, что в рамках настоящего исследования не учитывалось возможное снижение коэффициента лобового сопротивления при ветровом воздействии вдоль одной из граней башни (направление W2). Согласно данным ряда авторов, изменение угла атаки воздушного потока может существенно влиять на аэродинамическую эффективность решетчатых конструкций, формируя условия для частичного рассеивания потока и снижения аэродинамической нагрузки.

Так, в [20] на основе аэродинамического эксперимента показано, что для трубчатых и угловых элементов, используемых в поперечинах башенных сооружений, продольное обтекание может приводить к снижению аэродинамического сопротивления до 30 % по сравнению с перпендикулярным воздействием. В [21] предложена методика учета проницаемой структуры башни на основе элементного подхода, позволяющая более точно оценивать перераспределение потока при продольном обтекании. Авторы подчеркивают, что традиционные модели сопротивления воздуха переоценивают нагрузку при направлении вдоль решетки.

В [22] рассмотрено влияние ураганных ветров на свободностоящие башни, и установлено, что обтекание вдоль решетчатых элементов сопровождается уменьшением результирующего давления за счет аэродинамической стабилизации. Кроме того, в отечественном исследовании [23] подтверждено, что понижающий коэффициент давления, формируемый при ветровом воздействии вдоль грани, существенно отличается от нормативных значений и требует уточнения в расчетных процедурах.

В связи с изложенным целесообразно проведение дополнительных исследований, направленных на количественное определение снижения коэффициента лобового сопротивления для трехгранных антенно-мачтовых сооружений при действии ветра вдоль грани. Учет данного эффекта позволит повысить точность моделирования ветровой нагрузки и станет основой для корректировки существующих расчетных подходов.

4. Заключение

1. В ходе численного моделирования и анализа пяти различных трехгранных решетчатых АМС установлено, что определяющим фактором в проверке несущей способности конструкций является не только ветровая нагрузка, направленная перпендикулярно наветренной грани (традиционно используемая в строительных нормах), но и нагрузка вдоль одной из граней башни, которая вызывает более высокие усилия в ряде элементов.

2. Показано, что при действии ветра вдоль грани в элементах раскосов возникают максимальные сжимающие усилия, превышающие значения, получаемые при нормативном направлении ветра (в среднем на 20 %). Это может привести к снижению устойчивости и должно учитываться при проверке конструкций на предельные состояния.

3. Выявлена высокая чувствительность распорок к направлению ветровой нагрузки: при изменении угла атаки ветра прирост усилий может колебаться в среднем от –50 до +60 %. Такая непредсказуемость требует индивидуального подхода к моделированию этих элементов при инженерной экспертизе.

4. Обнаружен эффект закручивания (торсионной деформации) башен при ветре вдоль грани. Этот эффект обусловлен асимметрией нагрузки и может значительно влиять на пространственную работу конструкции, особенно у высоких башен со значительной гибкостью.

5. В отличие от отечественных норм, в которых направление ветра предполагается только перпендикулярным к грани, результаты настоящего исследования подчеркивают необходимость рассмотрения нескольких критических направлений ветровой нагрузки, исходя из пространственной геометрии сооружения и ее аэродинамических особенностей. Следует опираться на расчетные сценарии, определяемые инженерным анализом.

6. Установлено, что конструкция при направлении ветра вдоль грани становится более обтекаемой, что может снижать аэродинамическое сопротивление и усилия. Однако данный эффект не был учтен в расчетах и требует дополнительных экспериментальных и численных исследований с целью уточнения коэффициента лобового сопротивления.

7. Результаты могут быть использованы для пересмотра подходов к проектированию и экспертизе высотных башенных сооружений в международной практике. Методика применима не только к российским конструкциям, но и к аналогичным антенно-мачтовым системам, широко распространенным в странах с развитой телекоммуникационной инфраструктурой, особенно в регионах с переменными направлениями ветра.

References / Список литературы

1. Pichugin S. Makhinko A. Probabilistic model of wind load maxima. *Problems of the Technical Meteorology: proceedings of the 3-rd International Conference*, 2006 May 22–26; Lviv, 2006. P. 92–97.

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

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

3. Ioskevich A.V., Savchenko A.V., Egorova E.S., Ioskevich V.V., Polyanskikh M.A. Pulsation effects of wind to the antenna mast structures in software SCAD Office. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;3(30):81–97. (In Russ.) EDN: TUHVUR

Иоскевич А.В., Савченко А.В., Егорова Е.С., Иоскевич В.В., Полянских М.А. Пульсационные воздействия ветра на антенно-мачтовые сооружения в SCAD Office // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3 (30). С. 81–97. EDN: TUHVUR

4. Ioskevich A.V., Savchenko A.V. Comparison of SCAD Office and LIRA-SAPR on the example of calculation of communications tower. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014;10(25):7–21. (In Russ.) EDN: TBGDPF

Иоскевич А.В., Савченко А.В. Сравнение ПВК SCAD Office и Лира-САПР на примере расчета башни связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 10 (25). С. 7–21. EDN: TBGDPF

5. Mohamed Al Satari P.E., Saif Hussain S.E. Vibration based wind turbine tower foundation design utilizing soil-foundation structure interaction. *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*; 2008 October 12–17, Beijing, China, 2008;1020:577–584. <https://doi.org/10.1063/1.2963886>

6. Ferris M. *Wind Loading on Base Station Antennas*. 2009. Available from: <https://www.cosconor.fr/GSM/Divers/Equipment/Andrew/White%20papers/Wind%20loading.pdf> (accessed: 11.02.2025).

7. Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. ISBN 9780471121570

8. Khamidullin I.N., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Development and research towers for wind turbines *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2015;(4):25–32. EDN: UQFQFR
9. Ashraf M., Ahmad H.M., Siddiqi Z.A. A study of power transmission poles. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2005;6(6):511–532. Available from: https://www.researchgate.net/publication/228883307_A_study_of_power_transmission_poles (accessed: 11.02.2025).
10. Zhou Qi., Zhao L., Zhu Q., Zhu Y. Mean wind loads on equilateral triangular lattice tower under skewed wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;208:104467. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104467> EDN: JNSLEV
11. Strelkov U.M., Radaykin O.V., Sabitov L.S., Akhmerov A.V. Computer modeling of the wind power unit constructions with power over 2 MW. *E3S Web of Conferences. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems*. Kazan, 2019;124:05074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405074> EDN: RQAYKC
12. Zhang D., Song X., Deng H., Hu X., Ma X. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under Skew Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;214:104678. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104678> EDN: XOPYTX
13. Zhang W., Xiao Y., Li Ch., Zheng Q., Tang Ya. 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
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):1428. <https://doi.org/10.3390/buildings12091428> EDN: FJSQVE
15. Mailyan L.R., Yaziev S.B., Sabitov L.S., Konoplev Y.G., Radaykin O.V. Stress-strain state of the “combined tower-reinforced concrete foundation-foundation soil” system for high-rise structures. *E 3S Web of Conferences*. 2020;164: 02035. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016402035>
16. Zhao T., Li A., Yan H., Zhang L., Lan Zh., Huang M., Wu H. Comparison of the influence of double-limb double-plate joint on the stability bearing capacity of triangular and quadrilateral transmission tower structures. *Buildings*. 2022; 12(6):784. <https://doi.org/10.3390/buildings12060784> EDN: TEZOGT
17. He V., Zhao M., Feng W., Xiu Y., Wang Y., Feng L., Qin Y., Wang Ch. 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>
18. Atamanchuk A.V., Kholopov I.S. Investigation of the influence of wind current on a bundle of three pipes using the finite element method. *News of higher educational institutions. Construction*. 2005;(8):11–16. (In Russ.) EDN: PFAIKB
Атаманчук А.В., Холопов И.С. Исследования воздействия ветрового потока на пакет из трех труб с помощью метода конечных элементов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 8. С. 11–16. EDN: PFAIKB
19. Chernyshev D.D. Development of methodology of calculating tower structures with vent pipe bundles for wind load. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2010;(3):74–80. (In Russ.) EDN: MUFEDP
Чернышев Д.Д. Развитие методики расчета башенных сооружений с пакетами вытяжных труб на ветровую нагрузку // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 3. С. 74–80. EDN: MUFEDP
20. Ye J., Niu H., Liu G., Yang F. Zhang H., Chen Z. Experimental study of wind loads on tubular and tubular-angle steel cross-arms of transmission towers. *Physics of Fluids*. 2024;36(9):093606. <https://doi.org/10.1063/5.0219695>
21. Li Ch., Deng H.Zh., Yang Zi.Ye., Gan Yi.De., Hu X.Yi. A member-based porous method for predicting flow distortions around a lattice tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;218:104765. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104765> EDN: KHJVIR
22. Lorenzo F.I., Elena C.B., Rodríguez M.P., Parnás E.V.B. Dynamic analysis of self-supported Tower under Hurricane Wind Conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020;197:104078. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104078> EDN: MEZHDB
23. Ioskevich A.V., Savchenko A.V., Egorova E.S., Ioskevich V.V. The impact of the reduction factor of wind force coefficient to lattice structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;4(31):45–57. (In Russ.) EDN: UISIAF
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