

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА РАБОЧИЕ ПЛОЩАДКИ АНТЕННО-МАЧТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ РАСЧЁТОВ

Ю. Д. Маркина 

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

 poluektoff@bk.ru

В статье представлена методика поэлементного расчёта ветровой нагрузки на рабочие площадки антенно-мачтовых сооружений, рассматривающая ограждение как пространственную решётчатую конструкцию с индивидуальными аэродинамическими характеристиками элементов.

Актуальность исследования обусловлена высокой чувствительностью антенно-мачтовых сооружений к ветровым воздействиям и отсутствием формализованных методов расчёта нагрузок на вспомогательные элементы, вследствие чего в инженерной практике широко применяются упрощённые подходы, приводящие к существенным погрешностям. Цель работы состоит в повышении точности определения нормативной ветровой нагрузки на рабочие площадки и создании алгоритма, пригодного для интеграции в цифровые системы поддержки жизненного цикла сооружений.

Предложен алгоритм, реализованный в среде Microsoft Excel, включающий расчёт индивидуальных проекционных площадей, аэродинамических коэффициентов, коэффициента заполнения и поправочного коэффициента проницаемости. Выполнена апробация на реальной башне высотой 70 м и проведено сравнение с упрощённым методом эквивалентной площади. Показано, что упрощённый подход приводит к завышению нагрузки на 5–28 % и недооценке до –63 %.

Полученные результаты подтверждают научную и практическую значимость разработки и её перспективность для внедрения в комплексные отечественные системы автоматизации инженерных расчётов антенно-мачтовых сооружений.

Ключевые слова: башни, решётчатые конструкции, ветровая нагрузка, рабочие площадки, аэродинамические коэффициенты, автоматизация инженерных расчётов

Для цитирования: Маркина Ю. Д. Алгоритм оценки ветровой нагрузки на рабочие площадки антенно-мачтовых сооружений в условиях цифровизации расчётов. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 32–39. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-32-39>. EDN: SSZCZD.



© Маркина Ю. Д., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ALGORITHM FOR ASSESSING WIND LOADS ON WORKING PLATFORMS OF ANTENNA-MAST STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF DIGITALIZED ENGINEERING ANALYSIS

Ju. D. Markina 

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Il'inskaya St., 65, Nizhny Novgorod, 603000, Russia

 poluektoff@bk.ru

The paper presents a computational approach for evaluating wind loads acting on working platforms of antenna-mast structures within the context of modern digitalized engineering workflows. The proposed method treats platform guardrails as spatial lattice systems and accounts for the individual aerodynamic behavior of each structural element.

The relevance of the research is proved by the high sensitivity of antenna-mast structures to wind and by the absence of standardized procedures for calculating loads on auxiliary components, which often forces engineers to rely on simplified estimations with limited accuracy. The aim is to improve the reliability of wind

load assessment for working platforms and to develop an algorithm suitable for integration into digital life-cycle support systems. The method involves elementwise calculation of projected areas, aerodynamic drag coefficients, filling ratio, and porosity-related correction factors.

The algorithm is implemented in Microsoft Excel to ensure transparency, reproducibility, and seamless adoption in engineering practice. An approbation was performed on a real tower with a height of 70 m and a comparison was made with a simplified method of equivalent area. As a result, the simplified approach leads to an overestimation of the load by 5–28% and an underestimation up to –63%.

Therefore, the results highlight the scientific and practical significance of the development and its prospects for implementation in complex domestic automation systems for engineering calculations of antenna-mast structures.

Keywords: towers, lattice systems, wind load, working platforms, aerodynamic coefficients, automated engineering analysis

For citation: Markina Ju. D. Algorithm for assessing wind loads on working platforms of antenna-mast structures under conditions of digitalized engineering analysis. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):32–39. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-32-39>. EDN: SSZCZD. (In Russ.).



© Markina Ju. D., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Антенно-мачтовые сооружения (АМС) относятся к числу наиболее распространённых и конструктивно сложных инженерных объектов телекоммуникационной инфраструктуры. Их работоспособность и надёжность в значительной степени определяются воздействием ветровой нагрузки, которая является доминирующим фактором при расчётах прочности и эксплуатационной безопасности. Ветровые воздействия способны формировать значительные изгибающие моменты, повышенные перемещения и колебания, что требует строгого учёта нормативных требований при проектировании и обследовании АМС в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

За последние десятилетия вопросам определения ветровых нагрузок на мачтовые и башенные сооружения посвящено значительное число исследований [1–4]. Работы, выполненные в РФ и за рубежом, охватывают широкий спектр задач — от анализа динамической реакции башен на ветровые порывы [5, 6] до уточнения аэродинамических коэффициентов для решётчатых конструкций [7, 8]. В ряде современных программных комплексов, в частности в SCAD Office (пакет плагинов РешК), реализованы инструменты автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на несущие элементы решётчатых конструкций. Активно развивается использование численного моделирования, включая методы крупномасштабной вихревой симуляции (LES) для оценки распределения локальных давлений на стержнях пространственных решёток сложной формы [9, 10].

Несмотря на значительный объём исследований, основное внимание уделяется несущей конструкции АМС, тогда как вспомогательные конструктивные элементы — рабочие площадки для обслуживания оборудования — остаются малоизученными. Ограждения рабочих площадок представляют собой пространственные решётчатые конструкции, аэродинамическое поведение которых отличается высокой неоднородностью по высоте и направлению ветра. В инженерной практике для ускорения расчётов часто используется упрощённая методика, основанная на суммировании эквивалентных сплошных площадей, когда суммарная проекция элементов ограждения приводится к единой площа-

ди, на которую затем прикладывается нормативное давление. Однако этот подход не учитывает форму и положение каждого элемента, различия в аэродинамических коэффициентах элементов, проницаемость решётчатой секции и зависимость распределения давления от направления ветра. В результате формируются ошибки, которые могут приводить либо к завышению усилий, либо, что опаснее, к их занижению.

Современный этап развития цифровых технологий и переход отрасли к концепции цифровой поддержки жизненного цикла изделия (ЖЦИ) актуализируют потребность в формализованных, автоматизированных и воспроизводимых методах расчёта ветровой нагрузки на такие локальные конструктивные элементы [11, 12]. В этом контексте важной задачей является разработка алгоритма, позволяющего выполнять расчёт ветровой нагрузки на рабочие площадки как на пространственные решётчатые системы, в полном соответствии с требованиями СП 20.13330.2016, но без применения трудоёмких ручных вычислений.

Настоящее исследование посвящено разработке и формализации алгоритма расчёта ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС, в котором ограждение рассматривается как совокупность отдельных элементов с индивидуальными аэродинамическими и геометрическими характеристиками. Цель исследования — повысить точность определения ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС и предложить алгоритм, пригодный для цифровизации расчётов в рамках ЖЦИ. Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Проанализирована специфика восприятия ветровой нагрузки решётчатыми ограждениями площадок.
2. Сформирован нормативно обоснованный алгоритм раздельного расчёта нагрузки на элементы ограждения.
3. Разработана автоматизированная Excel-реализация алгоритма.
4. Выполнена апробация алгоритма на эксплуатируемой башне и проведено сравнение с упрощённым методом эквивалентных площадей.
5. Оценены перспективы внедрения разработанного подхода в цифровые системы поддержки ЖЦИ.



Рис. 1. Укрупненный алгоритм автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС
Fig. 1. Generalized algorithm for automated collection of the static component of the wind load on working platforms of antenna-mast structures

Представленные в статье результаты направлены на повышение качества инженерных расчётов, уменьшение неопределённости при проектировании АМС и развитие инструментов цифровой инженерии.

Объект и методы исследования

Задача заключается в создании универсального алгоритма определения нормативной ветровой нагрузки, действующей на пространственную рабочую площадку, закреплённую на АМС, с учётом всех существенных факторов: высоты расположения, геометрических параметров площадки, аэродинамических коэффициентов отдельных элементов и нормативных требований. Необходимо вычислить суммарную силу ветра, приложенную к площадке в соответствии с нормами.

На первом этапе формируется исходный набор параметров, включающий параметры АМС, автоматически импортируемые из Excel-модуля для автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню [13]: ветровой район, тип местности, форма контура поперечного сечения башни, тип покрытия, и параметры площадок, задаваемые пользователем (коэффициент неучтенных площадей, количество и геометрические параметры площадок и элементов, входящих в каждую площадку).

Алгоритм расчета опирается на методику, изложенную в СП 20.13330.2016. Нормативное значение основной ветровой нагрузки w_0 определяется как сумма средней и пульсационной составляющих. Средняя (статическая) составляющая рассчитывается по формуле:

$$w_m = w_0 k(z_c) c,$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления для данного региона (ветрового района); $k(z_c)$ — ко-

эффициент, учитывающий изменение давления по высоте z_c над землёй; c — аэродинамический коэффициент, зависящий от формы и ориентации поверхности.

Ключевым отличием предлагаемого алгоритма от упрощённого суммирования площадей является детальный учёт аэродинамических характеристик отдельных частей площадки. Каждый элемент ограждения рассматривается как отдельный аэродинамический объект. Площадка моделируется совокупностью элементарных поверхностей, для каждой из которых задаётся свой аэродинамический коэффициент c_{xi} в зависимости от формы поперечного сечения. Для стержневых элементов круглого поперечного сечения он определяется в соответствии с алгоритмом, описанным в [14]. Для вертикального ограждения принимается коэффициент как для пространственной решётчатой конструкции.

Последовательно вычисляются:

- площадь проекции каждого элемента $A_i = b_i \cdot l_i$, где b_i — габарит (диаметр или ширина профиля), l_i — длина элемента;
- аэродинамический коэффициент каждого элемента c_{xi} ;
- суммарная площадь всех элементов ΣA_i ;
- «аэродинамически взвешенная» площадь $\Sigma c_{xi} A_i$;
- площадь проекции контура площадки на перпендикулярную ветру плоскость A_k .

На основе определённых площадей Microsoft Excel рассчитывает:

- коэффициент заполнения контура решётчатой конструкции $\phi = (\Sigma A_i) / A_k$;
- коэффициент η , учитывающий влияние проницаемости пространственной решётчатой поверхности;
- коэффициент k_1 , зависящий от геометрии поперечного контура;



Рис. 2. Объект исследования
Fig. 2. Research subject

— аэродинамический коэффициент $c_x = (1/A_k) \times \sum c_{x_i} A_i$.

Итоговый аэродинамический коэффициент площади определяется выражением:

$$c = c_x(1 + \eta)k_1.$$

Использование этих зависимостей позволяет корректно учитывать частичную проницаемость ограждения и нелинейное влияние плотности заполнения на аэродинамическое сопротивление конструкции.

Расчётное значение ветрового воздействия определяется умножением нормативной величины на коэффициент надёжности по нагрузке γ_f :

$$w = w_m \gamma_f.$$

Разработанный алгоритм формирует статическую составляющую ветрового давления, поскольку именно она является исходной величиной для современных ПК. Пульсационная составляющая в инженерной практике рассчитывается средствами ПК автоматически на основе статической части. При завершении работы модуля формируется расчётная горизонтальная нагрузка на рабочую площадку. Блок-схема алгоритма автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на рабочие площадки показана на рис. 1.

Алгоритм реализован полностью в табличной форме, с использованием функций Microsoft Excel: ИНДЕКС, ПОИСКПОЗ — выбор табличных значений; ВПР — подбор аэродинамических коэффициентов и нормативных параметров; ПРОИЗВЕД, СУММ, СУММЕСЛИ — агрегирование по элемен-

там; линейная интерполяция (через ПРЕДСКАЗ) — нахождение $k(z_e)$.

Такая организация обеспечивает:

- мгновенное автоматическое обновление результатов при изменении входных данных;
- исключение ошибок ручного моделирования;
- возможность масштабирования алгоритма на площадку разной конфигурации;
- воспроизводимость расчётов;
- интеграцию в цифровые процессы ЖЦИ АМС.

Результаты и обсуждение

Для оценки практической применимости разработанного алгоритма была проведена его апробация на металлической башне сотовой связи высотой 70 м, расположенной в Калужской области (рис. 2). Башня представляет собой пространственную конструкцию в виде вертикального стержня, заземленного в основании. Конструкция опирается на фундаменты под каждой опорой. Внешняя форма башни до отм. +60,000 м — четырехгранная усеченная пирамида; с отм. +60,000 м и выше — четырехгранная призма. В основании башня имеет базу 7,515 м и на отм. +62,774 м — 1,096 м. Все несущие элементы (поояса, раскосы, распорки и диафрагмы) выполнены из прокатных уголков. Конструкция состоит из шести пирамидальных секций высотой 10,00 м и одной призматической секции высотой 9,82 м. Смежные секции соединены между собой накладками на болтах. Секции состоят из отдельных элементов с креплением на болтах. Внутри башни проходит лестница с корзиной ограждения, совмещенная с кабельростом, и площадками для отдыха в каждой секции на отм. +10,000 м, +20,000 м, +30,000 м,

Таблица 1. Ветровая нагрузка на рабочие площадки на отм. +60,000 м, +64,000 м и +70,000 м
Table 1. Wind load on working platforms located at elevations of +60.000 m, +64.000 m and +70.000 m

№	h_c , м	$k(z_c)$	Элемент	b , м	l , м	Кол-во	A_i , м ²	ΣA_i , м ²	A_k , м ²	φ	c_x/c	η	w_m' , кгс/м ²	$F/1,2F$, кгс
1	60	1,70	Поручень	0,05	4,00	3	0,20	0,60	4,80	0,27	0,36/0,60	0,698	33,65	161,52/193,82
			Стойка	0,05	1,20	5	0,06	0,30						
			Балка	0,08	4,00	1	0,32	0,32						
2а	64	1,72	Поручень	0,05	4,00	3	0,20	0,60	4,80	0,27	0,36/0,60	0,698	34,05	163,42/196,10
			Стойка	0,05	1,20	5	0,06	0,30						
			Балка	0,08	4,00	1	0,32	0,32						
2б	64	1,72	Поручень	0,05	1,50	3	0,08	0,23	2,25	0,22	0,29/0,51	0,778	28,99	65,22/78,26
			Стойка	0,05	1,20	2	0,06	0,12						
			Балка	0,08	1,50	1	0,12	0,12						
3	70	1,78	Поручень	0,05	2,70	4	0,14	0,54	3,24	0,43	0,58/0,82	0,432	48,06	155,72/186,86
			Стойка	0,12	1,20	4	0,14	0,58						
			Балка	0,08	2,70	1	0,22	0,22						

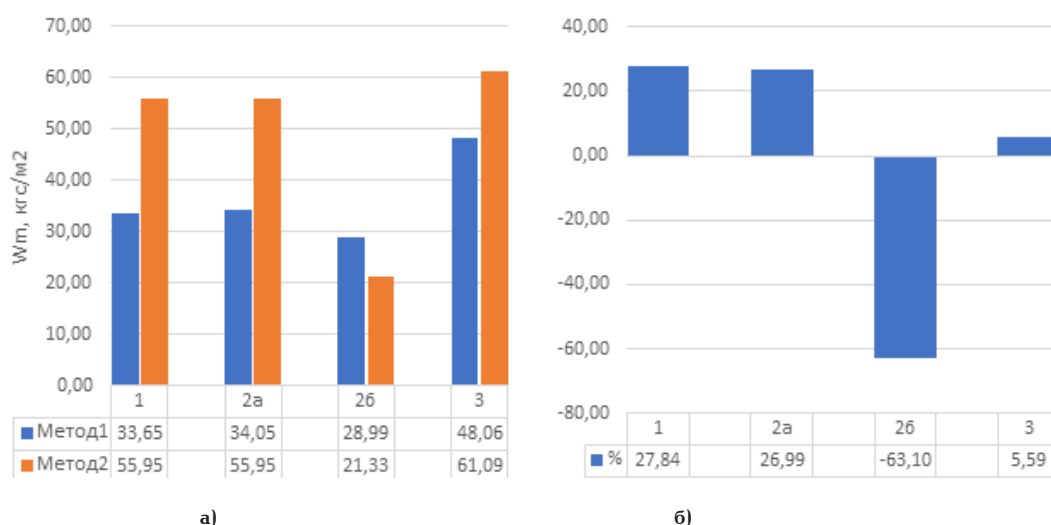


Рис. 3. Сравнение значений ветровой нагрузки, полученных поэлементным и упрощённым методами:
а) статическая составляющая; б) процентное отклонение статической составляющей упрощённого метода
относительно поэлементного
Fig. 3. Comparison of wind load values computed by the elementwise algorithm and the simplified method:
а) static component; б) percentage deviation of the simplified method relative
to the elementwise algorithm

+40,000 м, +50,000 м, +60,000 м, +64,000 м, +70,000 м.

Для трёх верхних рабочих площадок, расположенных на отметках +60,000 м, +64,000 м и +70,000 м, где ветровое воздействие достигает максимальных значений, выполнено определение нормативной ветровой нагрузки двумя независимыми методами.

— Метод № 1 — разработанный поэлементный алгоритм. Итоговые значения нагрузки представлены в табл. 1. Формат выходной таблицы специально разработан в соответствии с требованиями отчётной документации по расчёту несущей способности АМС и используется при формировании расчётных приложений, передаваемых в экспертные и проектные организации.

— Метод № 2 — упрощённая методика, основанная на приведении элементов площадки к эквивалентной сплошной площади, широко применяемая в инженерной практике вследствие простоты реализации и минимальных трудозатрат. В рамках данного подхода суммарная проекция

всех элементов площадки на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, рассматривается как сплошная поверхность, на которую прикладывается нормативное ветровое давление, определяемое по СП 20.13330.2016. Аэродинамический коэффициент принимается единым для всей площадки и не дифференцируется по отдельным элементам ограждения. При этом не учитываются индивидуальные аэродинамические характеристики элементов, проницаемость решётчатой конструкции, коэффициент заполнения и эффект перераспределения потока воздуха между элементами.

Сопоставление результатов для трёх верхних рабочих площадок, рассчитанных двумя методами, представлено на рис. 3. Полученные данные позволяют количественно оценить влияние проницаемости и поэлементного подхода на итоговую величину ветровой нагрузки и выявить случаи, когда применение упрощённого метода приводит к существенному завышению или недооценке нагрузок.

Для площадок № 1, № 2а и № 3 упрощённый метод показал рост нагрузки на 5–28 %, что объясня-

ется отсутствием учёта проницаемости ограждения, использованием одного усреднённого аэродинамического коэффициента с вместо индивидуальных, игнорированием коэффициентов ϕ и η . Такое завышение приводит к необоснованному увеличению сечений элементов крепления площадок, нагрузок на башню в узлах опирания площадки, затрат на металлоёмкость.

Площадка № 26 представляет собой конструкцию с меньшей суммарной площадью элементов, но и с меньшей площадью контура. Упрощённый метод не различил реального изменения геометрии и привёл к критическому недоучёту нагрузки на 63 %. Это особенно опасно, поскольку нагрузка оказывается меньше фактической, узлы крепления и элементы поясов могут испытывать недопустимое напряжённое состояние, а вероятность отказа возрастает.

На основании проведённого анализа можно выделить две устойчивые зависимости:

- чем выше расположена площадка, тем выше ошибка упрощённого метода из-за роста $k(z_g)$;

- чем неоднороднее геометрия ограждения, тем более значимо различие методов (алгоритм чувствителен к A_k , c_{xi} , ϕ , η , а упрощённый метод — нет).

Полученные результаты подтверждают, что упрощённый метод не обеспечивает необходимой точности для реальных АМС. Поэлементный алгоритм является более надёжным и универсальным: он корректно реагирует на изменение конфигурации площадки и обеспечивает реалистичную оценку ветровой нагрузки. Включение алгоритма в модуль расчёта АМС позволяет повысить точность оценки нагрузок, уменьшить металлоёмкость там, где это безопасно и обнаружить опасные случаи недоучёта, исключённые в упрощённой методике. Таким образом, апробация доказала необходимость перехода в инженерной практике АМС от упрощённых схем к поэлементным автоматизированным алгоритмам, подобным разработанному.

Другим важным преимуществом является автоматизация и удобство расчёта. Использование Microsoft Excel позволило превратить расчёт ветровой нагрузки в быстро выполняемую процедуру. После первоначальной настройки таблицы с формулами любой инженер может оперативно получить результат, изменяя ключевые параметры. Это особенно актуально в рамках концепции цифровой поддержки ЖЦИ: на разных стадиях жизненного цикла АМС требуется повторная оценка нагрузок (например, при установке новых антенн, проверке сооружения при реконструкции или в ходе эксплуатации). Наличие готового цифрового инструмента значительно ускоряет такие оценки и уменьшает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором при ручных расчётах. Исходные параметры АМС автоматически импортируются из разработанного ранее Excel-модуля статического сбора ветровой нагрузки на решётчатые башни [13]. Такой подход обеспечивает единообразие расчётов и их интеграцию в общий цифровой процесс анализа несущей способности АМС.

С точки зрения интеграции в инженерную практику, разработанный алгоритм хорошо вписывается в существующие рабочие процессы. Microsoft Excel широко используется в проектных организациях, и специалистам не требуется осваивать специализированное программное обеспечение для проведения данного расчёта — достаточно воспользоваться шаблоном таблицы. Более того, результаты, получен-

ные в Microsoft Excel, могут быть напрямую включены в отчётную документацию или перенесены в систему автоматизированного проектирования. Тем самым обеспечивается сквозная цифровая цепочка: от вычисления нагрузок до оценки прочности — всё с минимальным ручным вмешательством.

Разработанный модуль расчёта ветровых нагрузок на рабочие площадки уже интегрирован в функционирующую систему автоматизированного анализа несущей способности АМС, сформированную автором в предыдущих работах [15]. Указанная система объединяет несколько специализированных программных компонентов: модуль сбора статической составляющей ветровой нагрузки на элементы АМС, модуль расчёта нагрузок от антенно-фидерного оборудования, подсистему вычисления аэродинамических коэффициентов и расширяемую базу данных оборудования. Новый модуль органично дополняет существующую архитектуру, закрывая ранее отсутствующее звено — автоматизированный расчёт ветровой нагрузки на рабочие и технологические площадки. Формирование единой среды расчёта нагрузок позволяет обеспечивать: полную трассировку исходных данных, исключение ручного ввода, взаимосвязанность всех типов нагрузок, автоматическую генерацию отчётных таблиц и стандартизацию структуры входных данных для последующих расчётов в отечественных ПК.

В настоящее время ведётся разработка комплексной программы для расчёта ветровых и весовых нагрузок, интегрируемой с базой данных сортиментов металлопроката и совместимой с существующей подсистемой импорта — экспорта данных расчётной модели. На следующем этапе планируется расширение комплекса до полноценной системы цифровой поддержки жизненного цикла АМС, включающей:

- автоматизированное построение расчётных схем;
- генерацию нагрузочных сценариев с учётом фактического оснащения объекта;
- встроенную экспертизу несущей способности элементов;
- модуль формирования технической документации;
- базу цифровых прототипов эксплуатируемых АМС.

Таким образом, разработанный модуль является не только самостоятельным инструментом, но и элементом формирующейся отечественной платформы инженерных расчётов АМС, обеспечивающей сквозную цифровую поддержку процессов проектирования, обследования и эксплуатации.

Заключение

Разработан и формализован поэлементный алгоритм определения нормативной ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС, учитывающий индивидуальные геометрические и аэродинамические характеристики элементов ограждения, а также коэффициент заполнения и проницаемость решётчатой структуры. Алгоритм реализован в среде электронных таблиц Microsoft Excel, что обеспечивает автоматизацию вычислений, воспроизводимость результатов и возможность интеграции в цифровой контур инженерного анализа.

Апробация алгоритма на реальной башне высотой 70 м показала, что по сравнению с упрощённой методикой поэлементный подход обеспечивает существенно более корректное определение ветро-

вой нагрузки. Для трёх верхних площадок выявлено завышение нагрузки по упрощённому методу на 5–28 %, а в одном из случаев — критическое недоучётное расхождение до –63 %, обусловленное игнорированием геометрии и структуры ограждения. Полученные результаты подтверждают, что упрощённые методы обладают ограниченной применимостью и могут приводить как к неоправданному увеличению металлоёмкости конструкций, так и к опасному снижению требуемой прочности узлов опирания. Использование разработанного алгоритма снижает неопределённость расчётов, повышает достоверность оценки ветровых воздействий и обеспечивает стандартизацию отчётных форм в рамках расчёта несущей способности АМС.

Представленный модуль органично дополняет ранее созданные автором программные компоненты систем автоматизации расчётов АМС и формирует недостающее звено — автоматизированный расчёт ветровых нагрузок на рабочие и технологические площадки. В совокупности эти инструменты создают основу для формирования комплексной отечественной системы цифровой поддержки жизненного цикла АМС, включающей сбор данных, расчётные модули, экспертизу и автоматизированную генерацию отчётной документации.

Дальнейшее развитие исследования связано с расширением алгоритма, интеграцией с программными комплексами, автоматическим формированием расчётных схем, а также созданием единой цифровой платформы расчёта и сопровождения АМС.

Список источников / References

1. Кононов Д. А., Карлова Е. В., Беляева З. В. Некоторые проблемы определения ветровой нагрузки на решетчатые пространственные конструкции // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2023. Т. 9, № 2. 0902002. <https://doi.org/10.15826/rjct.2023.2.002>. EDN: GNVXLI.

Kononov D. A., Karlova E. V., Belyaeva Z. V. Some problems of determining the wind load on lattice spatial structures. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2023;9(2): 0902002. <https://doi.org/10.15826/rjct.2023.2.002>. EDN: GNVXLI. (In Russ.).

2. Габова В. В., Родионов А. В., Сиротенко О. О. Исследование поведения конструкций высотных зданий при воздействии ветровых нагрузок // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 5 (93). С. 5–17. EDN: ZMTJXN.

Gabova V. V., Rodionov A. V., Sirotenko O. O. Investigation of the behavior of structures of high-rise buildings under the influence of wind loads. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2023;5(93):5–17. EDN: ZMTJXN. (In Russ.).

3. Голиков А. В., Веремеев Д. В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1 (90). С. 14–32. EDN: KHISBG.

Golikov A. V., Veremeev D. V. Generalized principles of layout and dimensioning of trihedral lattice towers. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2023;1(90):14–32. EDN: KHISBG. (In Russ.).

4. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wind speed on structural behaviour of Monopole and self-support telecommunication towers. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017;18(6):911–927.

5. 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;8(4):343–358. <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0239-3>.

6. Голиков А. В., Михальчонок Е. А., Мельникова Ю. А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4. С. 53. EDN: GKJOAC.

Golikov A. V., Mikhachonok E. A., Melnikova Yu. A. Analysis of the effect of the lattice type on the distribution of forces in the tower. *Inzhenernyi Vestnik Dona*. 2019;4:53. EDN: GKJOAC. (In Russ.).

7. 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.

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. EDN: UISIAF. (In Russ.).

8. Сатанов А. А., Поздеев М. Л., Симонов А. В. [и др.]. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание // Приволжский научный журнал. 2022. № 3. С. 43–51. EDN: RSVTLK.

Satanov A. A., Pozdeev M. L., Simonov A. V. [et al.]. Experimental research of the distribution of aerodynamic coefficients on a high-rise building. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2022;3:43–51. EDN: RSVTLK. (In Russ.).

9. Tah A. M., Alsilevanai K. M., Özakça M. Comparison of various bracing system for self-supporting steel lattice structure towers. *American Journal of Civil Engineering*. 2017;5(2):60–68. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20170502.11>.

10. Mahesh N., Ranga Rao V. Design and estimation of electrical steel towers. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(1):646–652.

11. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*. 2018;6:3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.

12. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.

13. Маркина Ю. Д. Автоматизация сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22, № 9. С. 23–30. <https://doi.org/10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030>. EDN: UQDTZQ.

Markina Yu. D. Automated collection of the static component of wind load on lattice towers. *Herald Of Computer And Information Technologies*. 2025;22(9):23–30. <https://doi.org/10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030>. EDN: UQDTZQ. (In Russ.).

14. Маркин А. А., Маркина Ю. Д. Модуль расчёта аэродинамического коэффициента как элемент цифрового контура инженерного анализа антенно-мачтовых сооружений // Русский инженер. 2026. №1 (90). С. 87–92. EDN: ELENER.

Markin A. A., Markina Yu. D. Aerodynamic coefficient calculation module as an element of the digital framework for engineering analysis of antenna-mast structures. *Russian Engineer*. 2026;1(90):87–92. EDN: ELENER. (In Russ.).

15. Маркина Ю. Д. Автоматизация расчета несущей способности антенно-мачтовых сооружений // ГрафиКон 2025: сборник трудов 35-й Международной конференции. Йошкар-Ола, 2025. С. 715–723. <https://doi.org/10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-715-723>. EDN: YYREHE.

Markina Yu. D. Automation of load-bearing capacity calculation for antenna mast structures. *GraphiCon 2025: Proceedings of the 35th International Conference*. Yoshkar-Ola,

Информация об авторе:

МАРКИНА Юлия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория сооружений и технической механики» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 4203-4240

AuthorID (РИНЦ): 1229730

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7167-0652>

e-mail: poluektoff@bk.ru

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; одобрена после рецензирования 28.01.2026; принята к публикации 18.05.2026.

Information about the author:

MARKINA Yuliya Dmitriyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor 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: <https://orcid.org/0009-0006-7167-0652>

e-mail: poluektoff@bk.ru

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

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 04.12.2025; approved after reviewing 28.01.2026; accepted for publication 18.05.2026.