УДК 624.01:004.94
DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-715-723

Автоматизация расчета несущей способности антенно-мачтовых сооружений

Ю. Д. Маркина
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Представлены результаты разработки и внедрения элементов автоматизированной инженерной системы расчёта несущей способности антенно-мачтовых сооружений на базе отечественного программного обеспечения. Актуальность работы определяется массовой эксплуатацией и модернизацией антенно-мачтовых сооружений, а также ростом требований к инженерной экспертизе при реализации проектов цифровизации отрасли связи. Проведён комплексный численный анализ влияния направлений ветровой нагрузки и конфигурации оборудования на напряжённо-деформированное состояние конструкций, подтверждающий необходимость учёта нестандартных сценариев ветрового воздействия и пространственного расположения оборудования. Разработаны специализированные программные модули с графическим интерфейсом, реализующие автоматизированный сбор исходных данных, расчёт аэродинамических характеристик, задание ветровых нагрузок и генерацию отчётной документации в соответствии с требованиями нормативных документов. Создана интегрированная база данных оборудования, включающая более 1100 наименований антенно-фидерных устройств, что позволяет существенно сократить трудоёмкость инженерных расчётов и снизить вероятность ошибок. Выполненные работы подтвердили эффективность предлагаемого подхода к комплексной автоматизации расчёта несущей способности антенно-мачтовых сооружений, обеспечивая сокращение времени подготовки расчётных моделей и повышение точности инженерного анализа. Полученные результаты являются основой для дальнейшего создания единой инженерной системы расчёта, сопровождения и анализа антенно-мачтовых сооружений.

***Ключевые слова*:** антенно-мачтовые сооружения, несущая способность, автоматизация расчёта, ветровая нагрузка, цифровая модель, аэродинамика, программные комплексы, инженерный анализ.

Automation of load-bearing capacity calculation for antenna mast structures

Y. D. Markina
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the results of the development and implementation of components of an automated engineering system for calculating the load-bearing capacity of antenna mast structures based on domestic software. The relevance of the study is determined by the widespread operation and modernization of antenna mast structures, as well as the increasing requirements for engineering expertise within the framework of digitalization projects in the telecommunications sector. A comprehensive numerical analysis was conducted to assess the influence of wind load directions and equipment configurations on the stress-strain state of antenna mast structures, confirming the necessity of considering non-standard wind load scenarios and the spatial arrangement of equipment. Specialized software modules with graphical interfaces have been developed to enable automated collection of input data, calculation of aerodynamic characteristics, assignment of wind loads, and generation of reporting documentation in accordance with regulatory requirements. An integrated equipment database containing over 1,100 items of antenna-feeder devices has been created, significantly reducing the labor intensity of engineering calculations and minimizing the risk of errors. The completed work has confirmed the effectiveness of the proposed approach to comprehensive automation of antenna mast structures load-bearing capacity calculations, ensuring a reduction in the time required to prepare calculation models and improving the accuracy of engineering analysis. The obtained results provide a foundation for the further development of a unified engineering system for the calculation, support, and analysis of antenna mast structures.

***Keywords*:** antenna mast structures, load-bearing capacity, calculation automation, wind load, digital model, aerodynamics, software packages, engineering analysis.

Введение

Антенно-мачтовые сооружения (АМС) являются важнейшим элементом современной телекоммуникационной и технологической инфраструктуры. По данным Минцифры России и отраслевых аналитиков, на территории Российской Федерации эксплуатируется более 100 тысяч антенно-мачтовых сооружений различного назначения, включая объекты сотовой связи, телерадиовещания и промышленных систем [1, 2], при этом ежегодно вводятся в эксплуатацию тысячи новых объектов. Значительная часть АМС подвергается ежегодной модернизации и переоборудованию, связанным с расширением состава установленного оборудования [3].

Дополнительным фактором, усиливающим потребность в инженерных проверках и расчётах, является реализация «Проекта развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года» [4], предусматривающего развитие сетей 5G, подготовку инфраструктуры к технологиям 6G и значительное расширение сети связи. Это создаёт предпосылки к росту интенсивности эксплуатации и необходимости проведения расчётов несущей способности АМС в рамках переоборудования.

Одним из критических аспектов расчёта несущей способности АМС является учёт ветрового воздействия, включая влияние расположения оборудования при выборе критического направления ветра, что в настоящее время не регламентировано действующей нормативной базой [5]. Это усложняет инженерные расчёты и требует выполнения альтернативных расчётных сценариев для комплексного анализа конструкций.

Современные отечественные программные комплексы (SCAD Office, ЛИРА-САПР, RFEM) обеспечивают высокую точность инженерного анализа, включая моделирование сценариев ветрового воздействия, проверку устойчивости и прочности конструкций [6, 7]. Однако они не реализуют сквозной процесс расчёта и сопровождаются значительными трудозатратами на подготовку данных и формирование отчётности.

В связи с этим возникает объективная необходимость в создании специализированных программных модулей, обеспечивающих полный цикл моделирования, анализа и документирования расчётов несущей способности АМС, соответствующих отраслевым требованиям и интегрируемых в существующую цифровую инфраструктуру предприятий.

В данной статье приведены обобщенные результаты отдельных комплексных исследований автора по автоматизации расчета несущей способности АМС. Основные положения и расширенные численные данные в настоящее время приняты к публикации либо находятся на стадии подготовки к публикации и будут представлены в специализированных научных изданиях.

Постановка задачи

Итоговой целью исследования является разработка единой инженерной системы расчёта на базе отечественного программного обеспечения, предназначенной для комплексного анализа несущей способности антенно-мачтовых сооружений (АМС), их инженерного сопровождения и подготовки технической документации в рамках единого цифрового цикла.

Для достижения указанной цели планируется последовательно решить следующие ключевые задачи:

1. Разработка стандартизированных правил построения цифровых моделей АМС.
2. Формирование и актуализация базы данных оборудования с возможностью оперативного обновления при появлении новых технических решений.
3. Автоматизация процессов подготовки исходных данных для расчёта.
4. Интеграция отечественных программных комплексов в единый инженерный контур.
5. Создание специализированных расчётных модулей, учитывающих конструктивные и эксплуатационные особенности АМС.
6. Автоматизация процедур экспертизы и подготовки нормативно-технической документации.

Настоящая статья содержит промежуточные результаты выполненных на данном этапе работ по каждому из указанных направлений.

Теория

В рамках выполненной работы проведён комплексный анализ особенностей расчёта несущей способности АМС с учётом реальных конструктивных и эксплуатационных факторов. Объектами исследования выступили функционирующие АМС, расположенные в различных регионах Российской Федерации. АМС1 высотой 72 м расположена в Рязанской области; АМС2 высотой 70 м расположена в Тульской области; АМС3 высотой 67,5 м, АМС4 высотой 72,5 м и АМС5 высотой 40 м расположены в Калужской области. Особое внимание было уделено влиянию пространственного расположения технологического оборудования и направлений ветрового воздействия на напряжённо-деформированное состояние конструкций.

На основе численных исследований установлено, что традиционные подходы к выбору расчётных направлений ветра трехгранных АМС, ограниченные стандартным перпендикулярным направлением относительно одной из граней конструкции, не обеспечивают надлежащей полноты инженерного анализа. Моделирование показало, что при изменении направления ветра относительно конструкции, особенно при воздействии вдоль плоскостей граней, значительно возрастают усилия в отдельных элементах АМС. При этом локальные перераспределения нагрузок и пространственные деформации оказывают критическое влияние на общую работу сооружения. Численные исследования, выполненные на основании детальных моделей пяти реально эксплуатируемых АМС, подтвердили, что изменение направления ветрового воздействия, в частности при атаке воздушного потока вдоль одной из граней башни, приводит к перераспределению усилий между элементами конструкций и возникновению дополнительных напряжённых зон. Для расчёта процентного прироста сжимающих усилий за основу (100 %) принимались усилия в элементах АМС, полученные при ветровой нагрузке, направленной перпендикулярно грани, что соответствует методике определения ветровой нагрузки по [5]. Наибольшие отклонения по максимальным продольным усилиям Nmax зафиксированы в элементах решётки — раскосах и распорках, где прирост продольных сжимающих усилий может превышать 20 % по сравнению с нормативными расчётами, а поведение распорок демонстрирует нестабильность и высокую чувствительность к углу атаки потока (рис. 1).

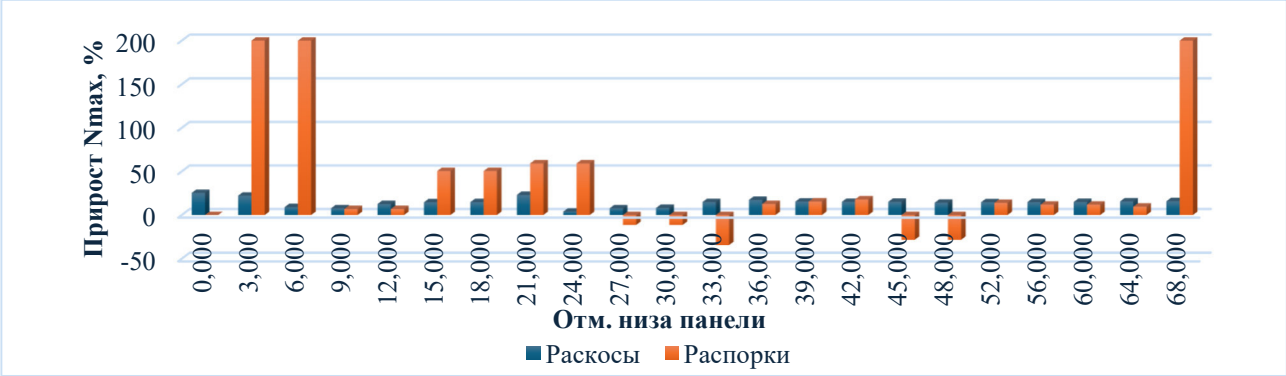
Кроме того, моделирование выявило характерное пространственное закручивание конструкции при воздействии ветра вдоль грани, что подтверждает необходимость учёта трёхмерного поведения сооружений при инженерных расчётах. Этот эффект обусловлен перераспределением ветровой нагрузки и возникновением крутящих моментов, что особенно актуально для гибких решётчатых конструкций и башенных сооружений. Современные экспериментальные и численные исследования подтверждают, что игнорирование пространственного закручивания может привести к существенным ошибкам в оценке напряжённо-деформированного состояния конструкции. Так, в [8] с использованием аэрогибкой модели стальной решётчатой башни показано, что при воздействии ураганного ветра возникает выраженный торсионный отклик конструкции. В работе [9] численным путём установлено, что угол атаки воздушного потока существенно влияет на коэффициент вибрационного отклика башен, что связано с перераспределением нагрузок и пространственным деформированием. В исследовании [10] экспериментально подтверждено наличие трёхмерных динамических нагрузок, а в [11] лабораторные испытания показали значительное возрастание моментов скручивания при косом ветре, аналогичном воздействию вдоль грани.

Отдельным направлением работы стал анализ влияния технологического оборудования, устанавливаемого на АМС, на аэродинамическое поведение конструкции. Выполненные моделирования с учётом реального размещения оборудования показали, что его расположение, габариты и парусность способны существенно изменять общую ветровую нагрузку, а следовательно, влиять на распределение внутренних усилий. Все расчеты выполнялись в ПК SCAD Office с использованием метода конечных элементов, что позволило учесть пространственную работу конструкции при различных направлениях ветровой нагрузки.

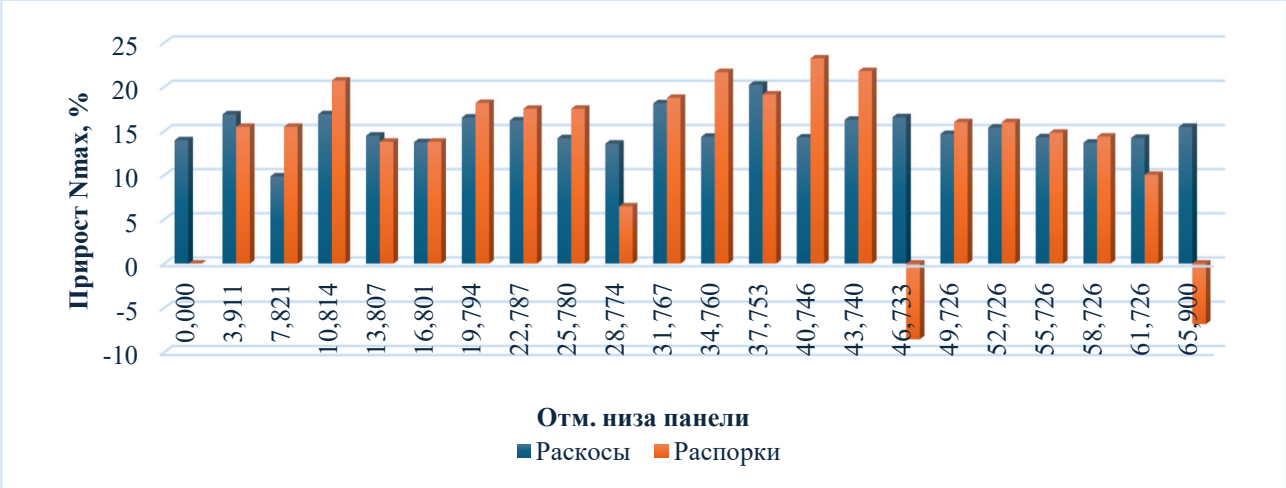
Таким образом, доказано, что при оценке несущей способности трехгранных АМС критическое значение имеют не только ветровое воздействие, действующее перпендикулярно наветренной грани [5], но и ветровое воздействие вдоль одной из граней башни, которое может приводить к повышенным усилиям в отдельных элементах. Также установлено, что для корректного выбора расчётного направления ветра необходимо учитывать как геометрию конструкции, так и фактическое расположение оборудования. Стандартного анализа по 1–2 направлениям ветра, предусмотренного [5], недостаточно. Количество и ориентация расчётных схем должны определяться индивидуально на основе инженерного анализа.

Сторонние исследования подтверждают, что для обеспечения надёжности АМС необходимо учитывать влияние нестандартных направлений ветрового воздействия, поскольку их игнорирование может приводить к недооценке усилий в отдельных элементах конструкций [12, 13]. Одновременно наблюдается активное развитие концепций цифровых двойников и информационного моделирования зданий [14, 15]. Однако, несмотря на прогресс в отдельных направлениях, комплексного решения,

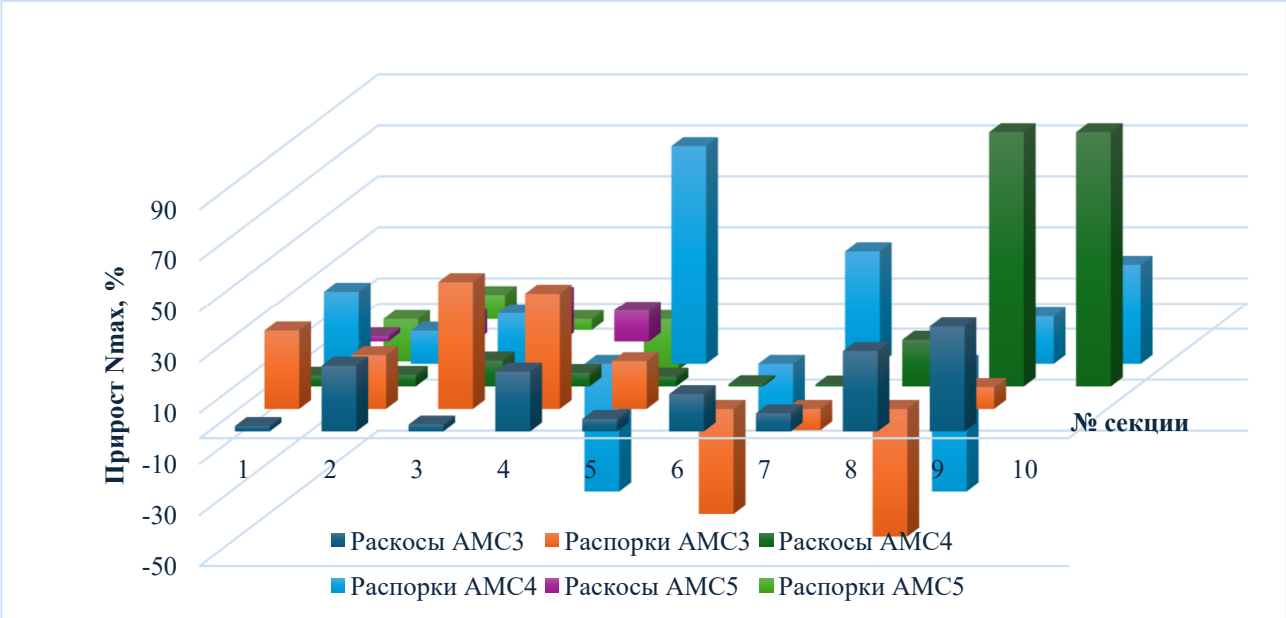
объединяющего процессы сбора данных, численного моделирования, расчёта и автоматизированного документирования в единую систему, до настоящего времени не создано.



а)



б)



в)

Рис. 1. Прирост Nmax элементов решетки: а) АМС1; б) АМС2; в) АМС3-5

Выполнен комплекс работ, направленных на автоматизацию подготовки исходных данных для расчёта несущей способности АМС, что является критически важным этапом инженерного анализа подобных объектов. Традиционно подготовка исходных данных, особенно для сложных

пространственных конструкций с большим количеством оборудования и вспомогательных элементов, требует значительных временных затрат и сопряжена с высоким риском ошибок.

В ходе исследования разработаны и внедрены программные модули, обеспечивающие автоматизацию следующих ключевых процессов:

- сбор статической составляющей ветровой нагрузки на элементы основной решётчатой конструкции башни. Программа формирует перечень конструктивных элементов, определяет их геометрические характеристики и автоматически рассчитывает нормативные ветровые нагрузки в соответствии с действующими стандартами;
- сбор статической составляющей ветровой нагрузки на элементы кабельроста, лестниц и кабельных трасс, размещённых на АМС;
- сбор ветровой нагрузки на рабочие и технологические площадки, расположенные на конструкциях АМС;
- задание рассчитанных нагрузок непосредственно на расчётную схему в ПК SCAD Office. За счёт интеграции с расчётной моделью полностью исключается необходимость ручного ввода данных, что повышает точность и воспроизводимость результатов;
- подготовка стандартизированной отчётной документации по результатам всех этапов сбора и задания ветровых нагрузок. Программные модули формируют отчёты, соответствующие требованиям нормативных документов и технического задания, что существенно снижает трудоёмкость подготовки технической документации;
- экспертиза несущей способности элементов решётчатой башни на основании результатов расчёта, включая автоматическую генерацию отчётных форм для представления в составе технической документации по результатам инженерного анализа несущей способности АМС.

Особенностью разработанного комплекса является интеграция с расчётными моделями, созданными в ПК SCAD Office. Геометрические характеристики конструктивных элементов, необходимых для расчёта ветровой нагрузки, и значения усилий, необходимые для последующего анализа, автоматически импортируются из SCAD Office, что практически полностью исключает необходимость ручного ввода данных и минимизирует влияние человеческого фактора. Комплекс масштабируем и позволяет добавлять новые типы оборудования и новые расчётные сценарии, планируется интеграция с расчётными моделями, создаваемыми в различных ПК.

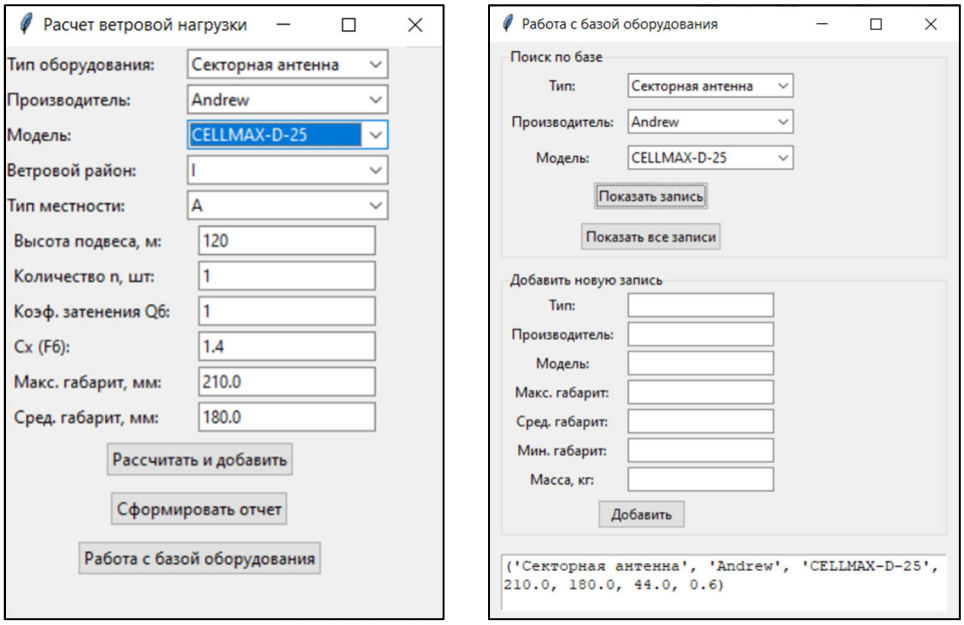
Реализация описанных подходов позволила существенно сократить трудоёмкость подготовки исходных данных, повысить точность результатов инженерного анализа и стандартизировать процедуру расчёта несущей способности АМС, что особенно актуально в условиях массового переоборудования и интенсификации эксплуатации подобных конструкций.

Также в рамках проекта разрабатывается комплекс специализированных программных средств с графическим пользовательским интерфейсом, предназначенный для автоматизации ключевых этапов подготовки исходных данных, необходимых для расчёта несущей способности АМС с учётом конструктивных и эксплуатационных особенностей. На данном этапе разработано три элемента комплекса.

Первым элементом является программа инженерного расчета нагрузок от антенно-фидерных устройств на антенно-мачтовые сооружения (рис. 2*а*). Это приложение, предназначенное для автоматизированного расчёта ветровой и весовой нагрузки от оборудования, размещаемого на АМС. Программа обеспечивает вычисление нормативных нагрузок на основе геометрических, конструктивных и аэродинамических характеристик оборудования, с последующим учётом их влияния при инженерном анализе общей пространственной модели АМС. Существенным преимуществом данного модуля является интеграция с расширяемой базой данных оборудования, что исключает необходимость ручного ввода информации и повышает точность расчётов. Как и в предыдущем модуле, реализована функция автоматической генерации отчётов, полностью соответствующих требованиям расчёта несущей способности.

База данных оборудования представляет собой структурированное справочное хранилище, включающее сведения о более чем 1100 наименованиях типового оборудования, устанавливаемого на антенно-мачтовых сооружениях: секториальных антеннах, радиомодулях, блоках питания, системных

модулях, климатических шкафов и прочем. Разработана программа для ведения и обновления базы данных антенно-фидерных устройств Пользовательский интерфейс программы (рис. 2*б*) предусматривает возможность быстрого поиска, просмотра технических характеристик оборудования, а также интерактивного расширения содержимого. Данный функционал позволяет поддерживать актуальность справочной информации, своевременно учитывать новые модели оборудования, поступающие на рынок, и оперативно обновлять данные расчётных моделей.



а) б)

Рис. 2. Пользовательский интерфейс программ: а) инженерного расчета нагрузок от антенно-фидерных устройств на антенно-мачтовые сооружения; б) для ведения и обновления базы данных антенно-фидерных устройств

Третьим компонентом комплекса является программный модуль, предназначенный для оперативного определения аэродинамических коэффициентов сопротивления Cx элементов конструкции с круговой цилиндрической поверхностью (рис. 3). Указанный модуль реализует алгоритмы расчёта Cx на основании геометрических характеристик элемента (диаметра, шероховатости поверхности) и параметров воздушного потока. Реализация пользовательского интерфейса обеспечивает интуитивно понятный процесс ввода исходных данных и генерации отчётных материалов. В модуле предусмотрена возможность многократного пакетного расчёта для групп элементов конструкции, а также автоматического формирования итоговых отчётов, выполненных в соответствии с требованиями, предъявляемыми к документации по расчёту несущей способности АМС.

Совокупность разработанных программных инструментов обеспечивает комплексное повышение эффективности инженерного анализа АМС за счёт значительного сокращения трудоёмкости подготовки исходных данных, снижения вероятности ошибок, связанных с ручным вводом информации, стандартизации отчётной документации, повышения точности и повторяемости расчётных процедур.

Реализация предложенного комплекса программных средств позволяет создать основу для дальнейшей интеграции в единую инженерную систему расчёта, анализа и сопровождения антенно-мачтовых сооружений.

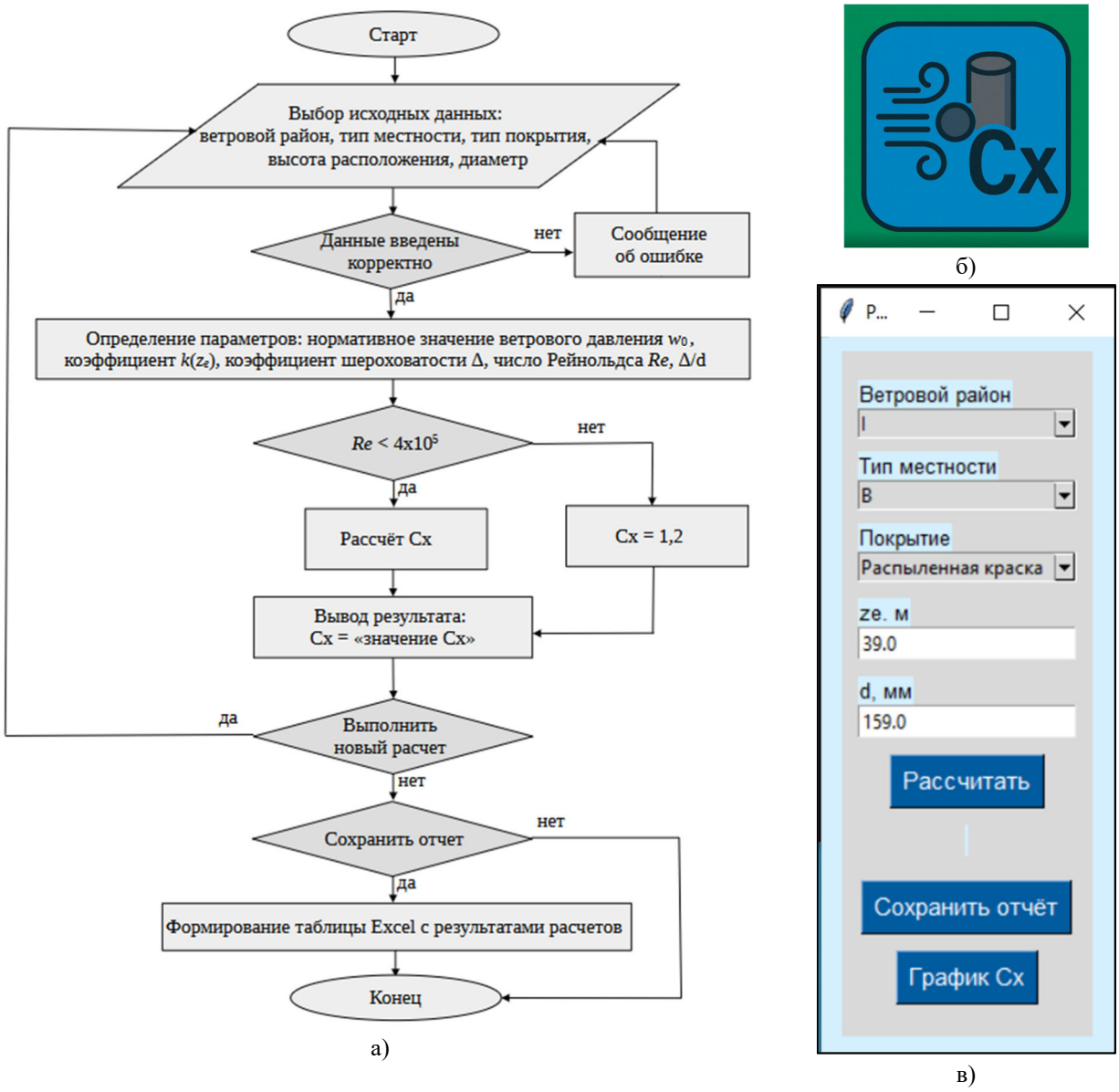


Рис. 3. Программа инженерного расчета аэродинамического коэффициента элементов с круговой цилиндрической поверхностью: а) блок-схема; б) иконка; в) пользовательский интерфейс программы

Результаты

В соответствии с ключевыми задачами, сформулированными ранее, выполнены следующие работы:

1. Разработка стандартизированных правил построения цифровых моделей АМС:

- Проведены численные исследования влияния нестандартных направлений ветровой нагрузки на напряжённо-деформированное состояние конструкций.
- Подтверждена необходимость индивидуального выбора направлений ветра и построения нескольких расчётных моделей АМС.

2. Формирование базы данных оборудования и аэродинамических характеристик:

- Сформирована база данных из 11339 наименований оборудования, устанавливаемого на АМС.
- База данных интегрирована с разработанными программными модулями.

3. Автоматизация подготовки исходных данных:

- Разработан алгоритм автоматизированного сбора и задания статической составляющей ветровой нагрузки на элементы конструкции и оборудование.
- Реализована генерация отчётов по результатам автоматического сбора данных в стандартизированной форме (Excel).

4. Интеграция существующих российских программных комплексов в общий инженерный контур:

- Автоматизирован экспорт исходных данных из Excel в SCAD Office и результатов расчёта из SCAD Office в Excel.

5. Разработка специализированных расчётных модулей для учёта особенностей АМС:

- Разработаны прототипы расчётных сценариев с учётом нестандартных направлений ветра и расположения оборудования.
- Подготовлены программные модули с графическим интерфейсом для расчёта аэродинамического коэффициента Cx элементов с круговой цилиндрической поверхностью и ветровой и весовой нагрузки от оборудования.

6. Автоматизация экспертизы и подготовки отчётности:

- Разработан прототип системы автоматизированной экспертизы несущей способности элементов решетчатых опор.
- Реализована генерация наиболее трудоемкой части отчётной документации на основе результатов расчётов без необходимости ручного ввода.
- Сформированы стандартизированные шаблоны отчётов, готовые к подаче в экспертные и надзорные организации.

Обсуждение результатов

Выполненные работы продемонстрировали практическую применимость предложенных подходов. База данных оборудования, автоматизация подготовки исходных данных и экспертизы снижает трудоёмкость инженерных расчётов и вероятность ошибок. Учёт нестандартных направлений ветра позволяет повысить достоверность оценки несущей способности конструкций. Интеграция существующих отечественных программных комплексов с разработанными модулями создаёт основу для формирования единого инженерного контура.

Вместе с тем для достижения итоговой цели требуется дальнейшее развитие системы, включая расширенные аэродинамические исследования, полную интеграцию всех компонентов, расширение функциональности и повышение степени автоматизации.

Заключение

Выполнены начальные этапы подготовки к созданию единой инженерной системы расчёта несущей способности АМС. Результаты подтверждают перспективность комплексного подхода к автоматизации расчёта АМС. Дальнейшее развитие работ будет направлено на создание полноценной отечественной инженерной системы, обеспечивающей расчёт, анализ, сопровождение и подготовку технической документации в едином цифровом цикле.

Список литературы

1. Минцифры России. Единый реестр антенно-мачтовых сооружений связи. Режим доступа: https://digital.gov.ru

2. Ассоциация операторов связи «Телеком-Союз». Состояние и перспективы развития АМС в РФ. 2023. Режим доступа: https://telecomunion.ru

3. GSMA. Россия: Обзор рынка мобильной связи и инфраструктуры. 2023. Режим доступа: https://www.gsma.com/russia

4. Проект развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года. Режим доступа: https://regulation.gov.ru/projects

5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: Минстрой России, 2016.

6. SCAD Soft. Программный комплекс SCAD Office: функциональные возможности и примеры применения. Режим доступа: https://www.scadsoft.com

7. ЛИРА-САПР. Системы автоматизированного проектирования и расчёта строительных конструкций. Режим доступа: https://www.liraland.ru

8. Zhang H., Huang X., Peng S. Aeroelastic modeling to study the wind-induced response of a self-supported steel lattice tower subjected to simulated hurricane winds // Engineering Structures. 2021. Vol. 244. 112759. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112759

9. Zhao S., Zhang C., Yue J., Gu M. Wind-induced vibration coefficient of landscape tower with curved and twisted columns based on wind tunnel test and numerical analysis // Buildings. 2022. Vol. 12, Issue 10. 1635. DOI: 10.3390/buildings12101635

10. Aly A. Investigation of 3-D dynamic wind loads on lattice towers // The Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. Vol. 39, iss. 8. P. 5863–5874. DOI: 10.1007/s13369-014-1173-5

11. Bashor R., Kareem A. Wind tunnel study of wind-induced torques on L-shaped tall buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2009. Vol. 97, iss. 3–4. P. 131–147. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.01.004

12. Хайбулина Р. З., Никулина О. Особенности определения ветровой нагрузки на металлические башни связи по РФ и Еврокодам // Журнал строительных конструкций. 2020. № 4. С. 95–108. DOI: 10.12345/jsc.2020.4.0095

13. Wang Z., Xu Y., Zhao J. Wind-induced responses and safety evaluation of communication towers using digital twin approach // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2023. Vol. 230. 105019. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105019

14. Stadtman F., Rasheed A., Kvamsdal T. Digital Twins in Wind Energy: Emerging Technologies and Future Directions // Renewable Energy Digitalization. 2023. Vol. 15. P. 45–65. DOI: 10.1016/j.red.2023.03.002

15. Kapteyn M. G., Willcox K. E. From Physics-Based Models to Predictive Digital Twins via Interpretable Machine Learning // Journal of Computational Mechanics. 2020. Vol. 58, no. 3. P. 211–225. DOI: 10.1002/jcm.31578