

Математическое моделирование аэродинамического поведения антенно-мачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном транспорте

А. А. ЛОКТЕВ¹, В. В. КОРОЛЕВ¹, О. И. ПОДДАЕВА², К. Д. СТЕПАНОВ², И. Ю. ЧЕРНИКОВ³

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ), Москва, 127994, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, 129337, Россия

³ Общество с ограниченной ответственностью «Инженерный центр технической экспертизы и диагностики «Эксперт» (ООО ИЦ «Эксперт»), Воронеж, 394038, Россия

Аннотация. С точки зрения действующих в России нормативов в области строительства и эксплуатации сооружений наиболее актуален анализ аэродинамического поведения сооружений связи, превышающих по высоте 75 м; они относятся к особо опасным, технически сложным сооружениям. Для подобных сооружений необходимо дополнительно определять аэродинамические коэффициенты с помощью продувок моделей сооружений в аэродинамических трубах или по рекомендациям, разработанным специализированными организациями. Работы могут быть достаточно дорогостоящими, особенно при изготовлении макетов сооружений и их последующей продувке в аэродинамических трубах. Данное исследование посвящено разработке математической модели поведения антенно-мачтового сооружения при ветровом воздействии, позволяющей определить аэродинамические коэффициенты при сборе нагрузок на проектируемое или эксплуатируемое сооружение, а также адекватно прогнозировать поведение и состояние самого объекта на различных этапах его жизненного цикла.

Ключевые слова: особо опасные сооружения связи; ветровая нагрузка; аэродинамические коэффициенты; нелинейные уравнения Навье — Стокса; соотношения неразрывности; дискретизация уравнений; линеаризация искомым функций

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретает проблема предоставления качественных каналов связи для пассажиров транспортных средств, систем управления и обеспечения безопасности, обусловленная сложностью быстрого позиционирования на местности экипажа, большим доплеровским расширением передаваемого сигнала, а также увеличивающимся объемом передаваемых данных. Концептуально возможно два пути решения проблемы: установка множества относительно небольших антенн передающих станций по пути следования или размещение мощных передатчиков на высоких антенно-мачтовых сооружениях с последующим формированием сотовой структуры сетевых

кластеров. Сооружения связи, высота которых превышает 75 м, но не превышает 100 м, относятся к особо опасным, технически сложным сооружениям связи, а при высоте более 100 м сооружения связи относятся к уникальным объектам [1]. Для таких сооружений в соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации необходимо дополнительно определять аэродинамические коэффициенты с помощью продувок моделей сооружений в аэродинамических трубах или по рекомендациям, разработанным специализированными организациями. Экспериментальные работы могут быть достаточно дорогостоящими, особенно при изготовлении макетов сооружений и их последующей продувке в аэродинамических трубах. С учетом этого актуальным и своевременным является разработка рекомендаций определения аэродинамических коэффициентов с дальнейшей возможностью их утверждения в качестве руководящего нормативно-технического документа. В настоящей работе описывается математическая модель динамического поведения антенно-мачтового сооружения при ветровой нагрузке с учетом пульсационных составляющих, позволяющая определить основные аэродинамические характеристики как самой конструкции, так и прикладываемых воздействий. Разработанная модель в перспективе может быть распространена и на более широкие классы особо опасных, технически сложных и уникальных объектов.

Постановка задачи. В качестве базовой конструкции рассмотрим антенно-мачтовое сооружение, выполненное в виде решетчатой башни высотой более 75 м (рис. 1). В общем случае для расчета такого сооружения, представленного в виде пространственно-стержневой схемы, по первой и второй группе предельных состояний достаточно хорошо подходят современные проектно-вычислительные комплексы

■ E-mail: korolevadim@mail.ru (В. В. Королев)

сы, разрешенные к официальному применению на территории Российской Федерации. Эти комплексы реализуют конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, подбор арматуры железобетонных конструкций, проверку несущей способности стальных конструкций. В основу такой расчета положен метод конечных элементов в перемещениях, а также действующие обязательные нормативные документы [2, 3, 4].

Антенно-мачтовое сооружение представляет собой четырехгранную пространственную решетчатую конструкцию, ствол которой состоит из отдельных стержневых элементов уголкового или трубчатого сечения, соединенных между собой с помощью болтов или сварки. Стыки поясов секций запроектированы многоболтовыми, стыковка осуществляется с помощью стыковых накладок болтами класса точности «В». Крепление решетки в секциях башни предусмотрено либо двумя болтами через фасонки, либо сварными соединениями. Опирание поясов башни на фундамент осуществляется через опорные листы, закрепленные анкерными болтами. Для обеспечения пространственной жесткости антенно-мачтового сооружения высотой более 75 м по всей его высоте расположены горизонтальные диафрагмы (рис. 1). Они могут состоять как из частей с различными наклонами граней к вертикальной оси (рис. 1, а — башня в Воронежской области), так и из частей с одинаковым наклоном граней по всей высоте конструкции (рис. 1, б — башня в Тамбовской области).

Традиционные методы. Стандартный расчет на прочность и устойчивость проектируемого или обследуемого антенно-мачтового сооружения может быть

выполнен с помощью метода конечных элементов [5, 6, 7], реализованного в различных программных комплексах, верифицированных и разрешенных к применению на территории России: Scad++, «Мираж», ANSYS и т. д. [5, 6, 7, 8]. Для этого необходимо представить конструкцию сооружения в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин и массивных тел), присоединенных к узлам (рис. 2). На рис. 2 представлена опорная часть антенно-мачтового сооружения в виде конечно-элементной модели с пронумерованными узлами и отдельными элементами (рис. 2, а), а также с пронумерованными типами жесткостей конечных элементов (рис. 2, б).

Тип конечного элемента определяется его геометрической формой, правилами устанавливающими зависимость между перемещениями узлов конечного элемента и узлов системы, физическим законом, определяющим зависимость между внутренними усилиями и внутренними перемещениями, набором параметров (жесткостей), входящих в описание этого закона и др. Но такой подход не позволяет достаточно точно определить влияние нестационарных процессов распространения упругих волн, аэродинамического воздействия ветра и других быстроизменяющихся видов нагружения на перемещения узлов и элементов, а также на усилия в них, поскольку в соответствии с идеологией метода конечных элементов истинная форма поля перемещений внутри элемента приближенно представлена различными упрощенными зависимостями, что может снижать точность результатов расчета при неоптимальном выборе размеров и типов конечных элементов.

Определяющие уравнения. В отличие от упомянутых традиционных методов авторами разработана математическая модель, в которой для определения аэродинамических коэффициентов каждого элемента или всей конструкции в целом предлагается рассмотреть систему трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики с учетом вязкого сопротивления типа Навье — Стокса [9, 10]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ &+ \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]; \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \\ &+ \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]; \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \\ &+ \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

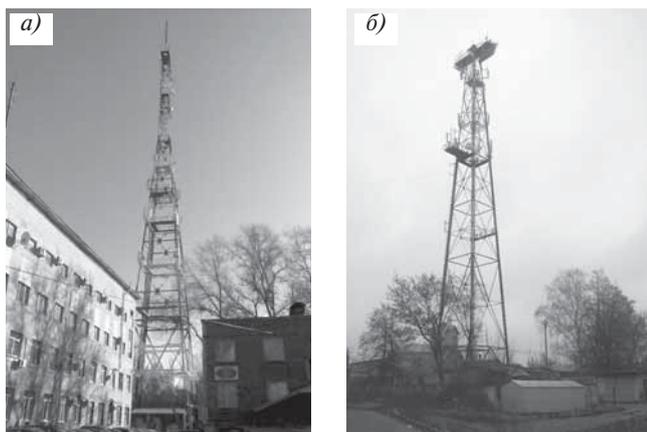


Рис. 1. Общий вид антенно-мачтового сооружения в виде четырехгранной усеченной пирамиды:

а — с тремя разнонаклоненными к вертикальной оси частями;

б — с одинаковым уклоном по всей высоте конструкции

Fig 1. General view of the antenna-mast structure in the form of a tetrahedral truncated pyramid: а — with three parts inconsistent with the vertical axis; б — with the same slope throughout the height of the structure

Решение определяющих уравнений (1) должно быть получено с учетом соотношений неразрывности и состояния [10, 11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$p = \rho RT. \quad (3)$$

В соотношениях (1) – (3) используются следующие обозначения: u, v, w — искомые компоненты вектора скорости (по осям x, y, z); p — давление; t — время; μ — динамический коэффициент вязкого сопротивления воздуха; ρ — плотность; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Для уменьшения вычислительной сложности процесса моделирования без серьезного ущерба точности решений инженерной задачи ветровые потоки предполагаются несжимаемыми ($\rho = \text{const}$) и изотермическими, при этом массовые силы не учитываются. Точное аналитическое решение уравнений Навье — Стокса возможно только для нескольких достаточно простых задач, не имеющих приложения в строительной индустрии [9, 10, 11].

В зарубежных исследованиях [9, 10, 11, 12, 13] часто для решения уравнений Навье — Стокса используют прямое численное моделирование, которое заключается в решении полных трехмерных нестационарных уравнений Навье — Стокса без использования специальных моделей турбулентности, но даже при современных возможностях ЭВМ этот подход реализуем только для малых скоростей потока, поэтому исследователям приходится применять различные модели турбулентности, снижающие вычислительную сложность задачи за счет введения некоторых упрощающих предположений. Другой возможный подход применяется при моделировании крупных вихрей. Для этого используется специальная фильтрация при выводе уравнений для разрешаемых масштабов [12, 13]. Важным вопросом при этом является то, что вблизи плоских элементов конструкции вихри малы, поэтому порядок энергоемких и диссипирующих вихрей совпадает. Этот факт создает серьезные ограничения по числу Рейнольдса (Reynolds) для возможного использования таких моделей в инженерных задачах.

Метод решения. В настоящем исследовании предлагается использовать метод, построенный на агрегировании полуэмпирического подхода, основанного на разложении скорости на среднюю во времени и пульсационную составляющие $v_i(t) = \bar{v}_i + v'_i(t)$ [6], использовании численно-аналитического метода, предложенного в [14, 15, 16] и прошедшего апробацию в тестовых задачах [16, 17, 18], а также на представлении уравнений (1) в осредненных по Рейнольдсу видах [15, 17]:

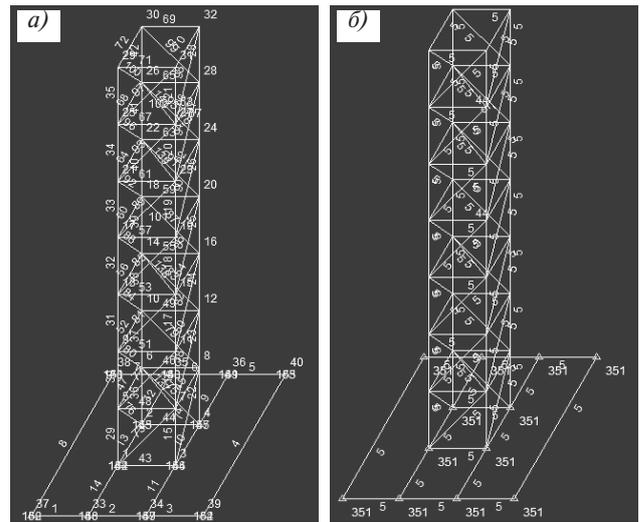


Рис. 2. Нижняя часть конечно-элементной модели антенно-мачтового сооружения в вычислительном программном комплексе: a — номера узлов и элементов; b — номера типов жесткостей элементов
 Fig. 2. The lower part of the finite-element model of the antenna-mast structure in the computer program complex: a — numbers of units and elements; b — numbers of element stiffness types

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{v}_i \bar{v}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \times \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho v'_i v'_j} \right], \quad \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

где \bar{p} — средние давления; индексы $i = 1, 2, 3$ и $j = 1, 2, 3$ соответствуют координатам x, y, z ; $\overline{\rho v'_i v'_j}$ — рейнольдсовы напряжения, представляют собой шесть неизвестных (дополнительно к осредненным \bar{v}_i и \bar{p}) и обычно аппроксимируются по гипотезе Буссинеска [14, 16]:

$$\overline{\rho v'_i v'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (5)$$

где μ_t — дополнительная вязкость, вызванная пульсациями; k — осредненная энергия турбулентных пульсаций; δ — символ Кронекера.

Для решения уравнений (1) – (3), переписанных в виде (4), необходимо добавить к определяющим соотношениям граничные условия для компонентов скоростей воздушных потоков v^i ($i = 1, 2, 3$), которые являются проекциями вектора скорости на оси декартовой системы координат (x, y, z) и давления p :

$$v^i|_{\partial\Omega} = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad v^i|_{\infty} = v^i_{\infty}, \quad i = 1, 2, 3; \quad p|_{\infty} = 0, \quad (6)$$

где Ω — рассматриваемое тело вращения вокруг оси z ; $\partial\Omega$ — его граница; v^i_{∞} — скорость вязкой среды в невозмущенном потоке.

Полученную систему определяющих уравнений предлагается представить в криволинейной системе координат (r, θ, φ) [11, 19, 20], что позволит некоторым образом упростить получаемые итоговые соотношения, первоначальные декартовы координаты при этом можно записать как

$$x = V(r, \theta)\cos\varphi; y = V(r, \theta)\sin\varphi; z = U(r, \theta). \quad (7)$$

При этом геометрические функции U и V предлагается выбрать исходя из выполнения следующих условий: $\psi = U + iV$; $z = r \exp(i\theta)$. Видно, что соотношения (7) геометрически задают отображение сферы единичного радиуса на поверхность рассматриваемого элемента конструкции Ω . Аналитический вид функций U и V представлен в [12, 15].

Особенностью представления функции V является ее неоднозначность при равенстве нулю, поскольку в этом случае угол φ может принимать любое значение; для избегания этого предлагается за искомые функции принять проекции вектора скорости v^i ($i = 1, 2, 3$) на оси декартовой системы координат. Частные производные по координатам x, y, z можно представить через производные по координатам r, θ и φ с помощью обобщенной функции $\Phi(x, y, z) = \Phi(V\cos\varphi, V\sin\varphi, U)$.

С помощью данных представлений можно переписать уравнения (1), (2) в новом координатном базисе, а граничные условия (6) посредством замены $v^i = (1-r)v_\infty^i + \tilde{v}^i$, $i = 1, 2, 3$ при $(\tilde{v}^i|_{r=0} = \tilde{v}^i|_{r=1} = 0)$ представить однородными.

Для решения системы определяющих уравнений согласно нормативным документам [5–7] ветровая нагрузка w должна быть представлена в виде выражения

$$w = w_m + w_p, \quad (8)$$

где w_m и w_p — средняя и пульсационная составляющая ветровой нагрузки соответственно.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте Z над поверхностью земли следует определять [6] по формуле

$$w_m = w_0 k(Z_e) c, \quad (9)$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления для заданного ветрового района; $k(Z_e)$ — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте для определенного типа местности; c — аэродинамический коэффициент.

Решение системы уравнений (1)–(3), записанных с помощью представленных выше преобразований и условий (6), предлагается искать в дискретном виде путем линеаризации искомых функций, при этом производные в уравнениях заменяются дискретными производными, найденными дифференцированием соответствующих интерполяционных формул [11, 14]. Оператор Лапласа от функций v^i ($i = 1, 2, 3$) при этом также представляется в дискретном виде относительно переменных (r, θ, φ) :

$$\Delta \tilde{u}^i = \frac{r}{Vw^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(rV \frac{\partial \tilde{u}^i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(V \frac{\partial \tilde{u}^i}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \tilde{u}^i}{\partial \varphi^2}. \quad (10)$$

После дискретизации определяющих уравнений Навье — Стокса в них войдут значения функций v^1, v^2, v^3 в узлах сетки $(\theta_v, r_\mu, \varphi_k)$, $v = 1, 2, \dots, n$; $k = 0, 1, \dots, 2l$, всего полученная система будет иметь $4mnL(L = 2l + 1)$ нелинейных уравнений.

Результаты моделирования. Далее полученные уравнения линеаризовываются исходя из предположения, что при достаточно малом шаге интегрирования на каждом интервале $(n-1)\tau \leq t \leq n\tau$ неизвестные искомые функции ведут себя линейно, т. е. производная неизвестной функции может вычисляться как отношение [21, 22, 23]

$$\dot{f}(n\tau) = (f_n - f_{n-1}) / \tau, \quad (11)$$

где f — неизвестная функция от времени, подлежащая определению; τ — элементарный временной интервал, через который оцениваются значения искомых величин.

Подставляя данное соотношение в определяющее уравнение, получим рекуррентное выражение [19, 22],

Результаты определения аэродинамических коэффициентов тремя методами в трех направлениях действия ветровой нагрузки
Results of determining the aerodynamic coefficients by three methods in three directions of the action of the wind load

Отметка по высоте Z_e , м	Численно-аналитический расчет			Численный расчет [24–26]			Двойная линейная интерполяция [5–7]		
	Направление ветра, оси			Направление ветра, оси			Направление ветра, оси		
	OY	OX	По диагонали	OY	OX	По диагонали	OY	OX	По диагонали
85,00	1,455	1,464	1,792	1,450	1,472	1,794	1,440	1,494	1,798
75,50	1,424	1,444	1,764	1,421	1,438	1,761	1,411	1,465	1,767
60,50	1,082	1,079	1,318	1,082	1,084	1,316	1,075	1,092	1,319
50,00	1,048	1,068	1,268	1,046	1,062	1,269	1,054	1,062	1,274
25,00	0,989	0,994	1,202	0,990	0,996	1,197	0,997	0,993	1,207
15,00	0,908	0,912	1,110	0,911	0,914	1,107	0,915	0,910	1,101

которое позволит определить значение неизвестной функции в каждый момент времени [24–26]. Результаты решения системы определяющих уравнений представлены в таблице.

Заключение. Сравнение значений аэродинамических коэффициентов внешнего воздействия в контрольных точках на поверхности антенно-мачтового сооружения, полученных по предлагаемой методике (численно-аналитический расчет), данных, полученных в ходе численного моделирования с использованием верифицированной трудоемкой методики и дорогостоящего программного обеспечения (численный расчет) и значений, полученных двойной линейной интерполяцией данных, приведенных в нормативных документах, позволяет увидеть хорошее соответствие данных, полученных с помощью разработанной методики и результатов использования вычислительного комплекса ANSYS с дополнительными программно-вычислительными модулями и библиотеками для аэродинамических расчетов.

Проведенные исследования показали, что предложенная методика дает достаточно точные значения функциональных коэффициентов. Она может быть рекомендована при определении ветровой нагрузки на антенно-мачтовые опоры в проектно-конструкторских работах для сооружений высотой более 75 м.

Использование конечно-элементной модели высотных сооружений связи, трехмерных нестационарных нелинейных уравнений типа Навье—Стокса, описывающих аэродинамическое воздействие на элементы конструкций, а также численно-аналитического метода решения этих уравнений позволяет достаточно точно определить аэродинамические коэффициенты ветровой нагрузки, действующей на каждый элемент или обособленную часть конструкции, сократить время выполнения вычислительных процедур и снизить сложность используемых алгоритмов, что достаточно важно для проектировщиков и исследователей, не обладающих уникальными компетенциями по моделированию аэродинамического поведения конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 29.07.2017 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.09.2017 г.).
2. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. М.: Стандартинформ, 2015. 13 с.
3. СП 16.13330.2011. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* / Минрегионразвития. М., 2011. С. 124.
4. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*/ Минстрой. М., 2016. С. 80.
5. Программный комплекс «МИРАЖ» для расчета конструкций на ПК. Инструкция пользователя. Киев: НИИАСС, 1995. 420 с.

6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 468 с.
7. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий [и др.]. Киев: Факт, 2005. 342 с.
8. Динамический расчет зданий и сооружений / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
9. Finn R. On the steady state solutions of the Navier–Stokes partial differential equations // Archive for Rational Mechanics and Analysis. 1959. Vol. 3. P. 381–396.
10. Fujita H. On the existence and regularity of the steady-state solution of the Navier–Stokes equation // Journal of the Faculty of Science University of Tokyo. 1961. Vol. 9. P. 59–102.
11. Finn R. Estimates at infinity for stationary solutions of the Navier–Stokes equations // Bulletin Mathématique de la Société des Sciences. Mathématiques et Physique de la RPR. 1959. Vol. 51. № 3. P. 387–418.
12. Finn R. On exterior stationary problem for the Navier – Stokes equation and associated perturbation problems // Archive for Rational Mechanics and Analysis. 1965. Vol. 19. P. 363–406.
13. Clar D. The vorticity at infinity for solutions of the stationary Navier–Stokes equations in exterior domains // Indiana University Mathematics Journal. 1971. Vol. 20. № 7. P. 633–654.
14. Бабенко К. И. Основы численного анализа. М.: Наука, 1986. 744 с.
15. Алгазин С. Д. Численные алгоритмы без насыщения в классических задачах математической физики. М.: Научный мир, 2002. 155 с.
16. Алгазин С. Д. Численное исследование уравнений Навье—Стокса // Журнал прикладной механики и технической физики. 2007. Т. 48. № 5. С. 43–52.
17. Меллер Н. Л., Пальцев Б. В., Хлюпина Е. Г. О конечно-элементных реализациях итерационных методов с расщеплением граничных условий для систем Стокса и типа Стокса в шаровом слое. Осесимметричный случай // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1999. Т. 39. № 1. С. 98–123.
18. Пальцев Б. В., Чечель И. И. О точных оценках скорости сходимости итерационных методов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в слое с условием периодичности // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2000. Т. 40. № 12. С. 1823–1837.
19. Локтев А. А. Удар вязкоупругого тела по упругой изотропной пластинке // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13. № 3. С. 417–425.
20. Локтев А. А. Упругопластическая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33. Вып. 16. С. 72–77.
21. Локтев А. А., Залетдинов А. В. Определение точек взаимодействия прямых и отраженных волн в пластинке // Вестник МГСУ. 2010. № 3–4. С. 303–308.
22. Loktev D. A., Loktev A. A. Determination of object location by analyzing the image blur // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8. № 11. P. 467–475.
23. Modeling the dynamic behavior of railway track taking into account the occurrence of defects in the system wheel–rail / A. Loktev, V. Sychev, B. Gluzberg, E. Gridasova // MATEC Web of Conferences 117 (2017). XXVI R-S-P Seminar 2017. Theoretical Foundation of Civil Engineering. P. 1–6. URL: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/31/contents/contents.html> (дата обращения: 05.10.2017).
24. An Experimental Study of the Effects of Wind on a Metal Bridge Crossing with Two Independent Parallel Spans / A. Loktev, O. Poddaeva, A. Fedosova, P. Churin // Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. 2017. Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics. P. 291–307. URL: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=62045 (дата обращения: 06.10.2017).

25. ANSYS CFX 14.5. User's Guide. Canonsburg: ANSYS Inc., 2012. URL: <https://openeclass.teimes.gr/modules/document/file.php/MYP143/Ansys%20tutorials.pdf> (дата обращения: 06.10.2017).

26. Egorychev O. O., Churin P. S., Poddaeva O. I. Experimental study of aerodynamic loads on high-rise buildings // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1082. P. 250–253. URL: <https://www.scientific.net/AMR.1082.250> (дата обращения: 08.10.2017).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛОКТЕВ Алексей Алексеевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

КОРОЛЕВ Вадим Вадимович,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

ПОДДАЕВА Ольга Игоревна,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика и строительная аэродинамика», НИУ МГСУ

СТЕПАНОВ Константин Дмитриевич,

аспирант, кафедра «Строительная и теоретическая механика», НИУ МГСУ

ЧЕРНИКОВ Игорь Юрьевич,

ведущий специалист, ООО ИЦ «Эксперт»

Статья поступила в редакцию 30.10.2017 г., принята к публикации 17.12.2017 г.

Mathematical modeling of aerodynamic behavior of antenna-mast structures when designing communication on railway transport

A. A. LOKTEV¹, V. V. KOROLEV¹, O. I. PODDAEVA², K. D. STEPANOV², I. Yu. CHERNIKOV³

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT), Moscow, 127994, Russia

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, 129337, Russia

³Limited Liability Company "Engineering Center for Technical Expertise and Diagnostics "Ekspert" (LLC IC "Expert"), Voronezh, 394038, Russia

Abstract. Due to the development of high-speed operation, the problem of providing high-quality communication channels for train passengers, control and security systems, caused by the difficulty of fast positioning of the carriage, the large Doppler extension of the transmitted signal and the increasing amount of data transferred, is becoming especially topical at present. Two solutions can be conceptually possible in order to increase the coverage area near the railroad right-of-way: installation of a set of relatively small antennas of transmitting stations along the track or installation of powerful transmitters on high antenna-mast structures.

Communication facilities exceeding 75 m are classified as particularly dangerous, technically complex communication facilities, and communication facilities exceeding 100 m, — as unique facilities. According to normative legal documents for structures classified as particularly dangerous, technically complex or as unique objects, it is necessary to additionally determine the aerodynamic coefficients by blowing structures in wind tunnels or by recommendations developed by specialized organizations. In view of the above, it is relevant to solve the problem of developing recommendations for the determination of aerodynamic coefficients and its approval as a guiding regulatory and technical document.

This study is devoted to the development of a mathematical model for the behavior of an antenna-mast structure under wind influence, which would allow determining the aerodynamic coefficients when collecting loads on newly designed or currently operated structures, and also adequately predict the behavior and condition of the object at various stages of the life cycle.

Keywords: particularly dangerous constructions of communication; wind load; aerodynamic coefficients; nonlinear Navier — Stokes equations; continuity ratio; discretization of equations; linearization of unknown functions

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-2-77-83>

REFERENCES

1. *Urban Development Code of the Russian Federation dated December 29, 2004, no. 190-FZ* (revised at July 29, 2017)

(as amended and supplemented, effective from September 30, 2017) (in Russ.).

2. GOST 27751–2014. *Reliability of building structures and foundations*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 13 p. (in Russ.)

3. SP 16.13330.2011. *Set of rules. Steel structures*. Updated version of SNiP II-23-81*. Moscow, Minregionrazvitiya Publ., 2011, p. 124 (in Russ.).

4. SP 20.13330.2016. *Set of rules. Loads and impacts*. Updated version of SNiP 2.01.07 85*. Moscow, Minstroy Publ., 2016, p. 80 (in Russ.).

5. *Programmnyy kompleks «MIRAZh» dlya rascheta konstrukt-siy na PK. Instruktsiya pol'zovatelya* [MIRAGE software package for calculating structures on a PC. User's Manual]. Kiev, NIASS Publ., 1995, 420 p.

6. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975, 468 p.

7. Gorodetskiy A. S., Zavoritskiy V. I., Lantukh-Lyashchenko A. I., Rasskazov A. O. *Metod konechnykh elementov v proektirovanii transportnykh sooruzheniy* [The finite element method in the design of transport structures]. Kiev, Fakt Publ., 2005, 342 p.

8. Korenev B. G., Rabinovich I. M. *Dinamicheskiy raschet zdaniy i sooruzheniy* [Dynamic calculation of buildings and structures]. Moscow, Stroyizdat, 1984, 303 p.

9. Finn R. *On the steady state solutions of the Navier–Stokes partial differential equations*. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1959, Vol. 3, pp. 381–396.

10. Fujita H. *On the existence and regulates of the steady-state solution of the Navier–Stokes equation*. Journal of the Faculty of Science University of Tokyo, 1961, Vol. 9, pp. 59–102.

11. Finn R. *Estimates at infinity for stationary solutions of the Navier–Stokes equations*. Bulletin Mathématique de la Société des Sciences. Mathématiques et Physique de la RPR, 1959, Vol. 51, no. 3, pp. 387–418.

12. Finn R. *On exterior stationary problem for the Navier–Stokes equation and associated perturbation problems*. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1965, Vol. 19, pp. 363–406.

13. Clar D. *The vorticity at infinity for solutions of the stationary Navier – Stokes equations in exterior domains*. Indiana University Mathematics Journal, 1971, Vol. 20, no. 7, pp. 633–654.
14. Babenko K.I. *Osnovy chislennogo analiza* [Fundamentals of numerical analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 744 p.
15. Algazin S.D. *Chislennye algoritmy bez насыshcheniya v klassicheskikh zadachakh matematicheskoy fiziki* [Numerical algorithms without saturation in classical problems of mathematical physics]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2002, 155 p.
16. Algazin S.D. *Chislennoe issledovanie uravneniy Nav'e – Stoksa* [Numerical investigation of the Navier – Stokes equations]. Zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki, 2007, Vol. 48, no. 5, pp. 43–52.
17. Meller N.L., Pal'tsev B.V., Khlyupina E.G. *O konechno-elementnykh realizatsiyakh iteratsionnykh metodov s rasshchepleniem granichnykh usloviy dlya sistem Stoksa i tipa Stoksa v sharovom sloe. Osesimmetrichnyy sluchay* [On finite-element realizations of iterative methods with splitting of boundary conditions for Stokes systems and Stokes type in the spherical layer. Axisymmetric case]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki, 1999, Vol. 39, no. 1, pp. 98–123.
18. Pal'tsev B.V., Chechel' I.I. *O tochnykh otsenkakh skorosti skhodimosti iteratsionnykh metodov s rasshchepleniem granichnykh usloviy dlya sistema tipa Stoksa v sloe s usloviem periodichnosti* [On exact estimates of the rate of convergence of iterative methods with splitting of boundary conditions for a Stokes type system in a layer with the periodicity condition]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki, 2000, Vol. 40, no. 12, pp. 1823–1837.
19. Loktev A.A. *Udar vyazkouprugogo tela po uprugoy izotropnoy plastinke* [Impact of a viscoelastic body on an elastic isotropic plate]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsey, 2007, Vol. 13, no. 3, pp. 417–425.
20. Loktev A.A. *Uprugoplasticheskaya model' vzaimodeystviya tsilindricheskogo udarnika i plastinki* [Elastic-plastic model of interaction between a cylindrical striker and a plate]. Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2007, Vol. 33, no. 16, pp. 72–77.
21. Loktev A.A., Zaletdinov A.V. *Opreделение tochek vzaimodeystviya pryamykh i otrazhennykh voln v plastinke* [Determination of points of interaction of straight and reflected waves in a plate]. Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU], 2010, no. 3–4, pp. 303–308.
22. Loktev D.A., Loktev A.A. *Determination of object location by analyzing the image blur*. Contemporary Engineering Sciences. 2015, Vol. 8, no. 11, pp. 467–475.
23. Loktev A., Sychev V., Gluzberg B., Gridasova E. *Modeling the dynamic behavior of railway track taking into account the occurrence of defects in the system wheel – rail*. MATEC Web of Conferences 117 (2017). XXVI R-S-P Seminar 2017. Theoretical Foundation of Civil Engineering. Pp. 1–6. URL: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/31/contents/contents.html> (retrieved on 05.10.2017).
24. Loktev A., Poddaeva O., Fedosova A., Churin P. *An Experimental Study of the Effects of Wind on a Metal Bridge Crossing with Two Independent Parallel Spans*. Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications, 2017, Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics, pp. 291–307. URL: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=62045 (retrieved on 06.10.2017).
25. ANSYS CFX 14.5. *User's Guide*. Canonsburg: ANSYS Inc., 2012. URL: <https://openeclass.teimes.gr/modules/document/file.php/MYP143/Ansys%20tutorials.pdf> (retrieved on 06.10.2017).
26. Egorychev O.O., Churin P.S., Poddaeva O.I. *Experimental study of aerodynamic loads on high-rise buildings*. Advanced Materials Research, 2015, Vol. 1082, pp. 250–253. URL: <https://www.scientific.net/AMR.1082.250> (retrieved on 08.10.2017).

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. LOKTEV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department “Transport construction”, FGBOU VO RUT (MIIT)

Vadim V. KOROLEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department “Transport construction”, FGBOU VO RUT (MIIT)

Ol'ga I. PODDAEVA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Physics and construction aerodynamics”, NRU MGSU

Konstantin D. STEPANOV,

Post-graduate, Department “Construction and theoretical mechanics”, NRU MGSU

Igor' Yu. CHERNIKOV,

Leading Expert, LLC IC “Ekspert”

Received 30.10.2017

Accepted 17.12.2017

E-mail: korolevadim@mail.ru (V.V. Korolev)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

АСУ «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / А. В. Комиссаров [и др.]; под ред. А. В. Комиссарова. Ногинск: АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. 128 с. (Труды ОАО «ВНИИЖТ»).

В книге рассмотрены бизнес-процессы пассажирских перевозок с использованием автоматизированной системы управления пассажирскими перевозками «Экспресс-3». Читателю предоставляется возможность ознакомиться с этапами развития информационных технологий пассажирского комплекса ОАО «РЖД» на базе АСУ «Экспресс-3».

Издание предназначено для руководителей и инженерно-технического состава пассажирского комплекса, специалистов, связанных с разработкой и внедрением информационных технологий на железных дорогах РФ, научных работников, преподавателей и студентов транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.