

УДК 624.074.5

## Выбор оптимального значения цилиндрических элементов башенных сооружений

Веремеев Д. В., Пегин П. А.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Веремеев Д. В., Пегин П. А. Выбор оптимального значения цилиндрических элементов башенных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 417–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-417-426

### Аннотация

**Цель:** выявление наиболее рациональных типов сечений с цилиндрической формой поверхности в соответствии с критерием минимизации ветрового воздействия на элемент посредством исследования графика аэродинамических коэффициентов для элементов данного типа сечения, представленного в действующей нормативной документации, и с учетом принятых параметров шероховатости поверхности, значения ветрового давления, а также набора высот относительно поверхности земли. Применение результатов исследований к существующим типам сечений с цилиндрической поверхностью, выполняемых по ГОСТ. **Методы:** анализ существующей научно-технической литературы, затрагивающей вопрос экспериментальных исследований аэродинамических показателей сечений цилиндрической формы. Рассмотрение аналитических выражений вычисления ветрового воздействия на сечения цилиндрической формы с их последующим преобразованием для получения промежуточных значений. Проведение аппроксимации кривой графика значений аэродинамических коэффициентов. **Результаты:** разработан метод выявления диапазонов диаметров сечений цилиндрической формы поверхности, расположенных в критической области чисел Рейнольдса. Получена формула определения аэродинамического коэффициента критической области чисел Рейнольдса путем аппроксимации кривой графика аэродинамических коэффициентов, расположенных на границе критической и закритической области чисел Рейнольдса. Выявлена разница между значениями ветрового воздействия на различные диаметры труб, получен финальный график, иллюстрирующий снижение ветрового воздействия на трубы большего диаметра и разницу со значениями ветрового воздействия на трубы меньшего диаметра, которая может достигать 16%. **Практическая значимость:** возможность использования выведенного метода для получения наиболее рациональных сечений с цилиндрической формой поверхности по параметру наименьшего ветрового воздействия на элемент с учетом принятых значений шероховатости поверхности и ветрового давления, а также набора высот относительно поверхности земли. Метод позволяет разрабатывать более рациональные и экономичные решетчатые конструкции башенных сооружений благодаря снижению ветрового воздействия на отдельные элементы.

**Ключевые слова:** башня, круглый элемент, цилиндрическое сечение, ветровое воздействие, аэродинамический коэффициент, оптимальные сечения труб, нагрузка, элементы решетки, число Рейнольдса

Различные строительные конструкции, различных типов высотных сооружений [1]. здания и сооружения, находящиеся на открытом пространстве, постоянно подвергаются Ветровое воздействие является динамическим и во многом случайным по своей природе. Математическое описание ветрового воздействия является особо формообразующим для действия достаточно логично разделяется на

статическую и пульсационную составляющие ветровой нагрузки, которые приводят к детерминированному процессу с целью определения его требуемого значения [2]. Подход к определению динамической реакции конструкции (пульсационной составляющей) на ветровое воздействие основан на предпосылках, вероятно, введенных А. Давенпортом [3]. Процесс инженерного расчета такого воздействия с учетом статической и пульсационной составляющих представлен в действующих нормах СП 20.13330.2016 [4].

Несмотря на то что принципиально подходы к расчету ветрового воздействия, представленные в нормативных документах различных стран, похожи, присутствуют некоторые аспекты, которые могут привести к существенным отличиям в результатах. К таким расчетным составляющим можно отнести:

- интервалы осреднения скорости ветра;
- закон изменения скорости ветра по высоте [5];
- коэффициенты, учитывающие дополнительные факторы и различные особенности, например, такие как рельеф, сечения и профили зданий [6].

Одним из важных компонентов статической составляющей ветровой нагрузки являются аэродинамические коэффициенты. Они зависят от ряда факторов, например, шероховатости, числа Рейнольдса и геометрических параметров рассматриваемого объекта. При этом значения аэродинамических коэффициентов для различных форм и типов поверхностей элементов получают как обдувами натуральных моделей в аэродинамических трубах, так и различными численными методами Computational fluid dynamics (CFD) [7, 8, 9].

В случае ветрового воздействия на стальные решетчатые башни данный тип нагрузки часто является определяющим при расчете на-

пряженно-деформированного состояния (НДС) данных сооружений. Это можно пронаблюдать в исследованиях [10–13], где представлено моделирование некоторых случаев ветровых воздействий на башенные сооружения. В связи с этим получение наименьших значений аэродинамических коэффициентов может являться одним из факторов оптимизации конструктивных решений по критерию металлоемкости, что было положено в основу разработки башен так называемого обтекаемого типа [14], что является одним из методов нетрадиционной оптимизации [15]. Наиболее оптимальным сечением решетчатых конструкций с точки зрения аэродинамики является форма цилиндрической поверхности, которая получила большое распространение в виде сортового круглого проката и труб. Они обладают особенностью нелинейной изменчивости аэродинамического коэффициента, зависящего от ряда факторов [16].

Расчеты элементов, выполненных из труб и входящих, например, в состав отдельно стоящей плоской решетчатой конструкции (ОСПРК), которая при этом подвергается ветровому воздействию, показывают, что подбираемые сечения труб, имеющие схожие прочностные характеристики, обладают значительно отличающимися показателями значений аэродинамических коэффициентов. Это оказывает большое влияние на статическую составляющую ветровой нагрузки ( $w_m$ ) и на конструкцию в целом:

$$w_m = w_0 k(z_e) c, \quad (1)$$

где  $w_0$  — нормативное значение ветрового давления;

$k(z_e)$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты  $z_e$ , принимаемый в соответствии с табл. 11.2 СП 20.13330.2016 [4];

$c$  — аэродинамический коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$c = c_x = \frac{1}{A_k} \sum c_{xi} A_i, \quad (2)$$

где  $A_k$  — площадь, ограниченная контуром конструкции;

$A_i$  — площадь проекции  $i$ -го элемента конструкции;

$c_{xi}$  — аэродинамический коэффициент для элементов круглого сечения, входящих в состав ОСПРК, вычисляемый по формуле:

$$c_{xi} = k_\lambda c_{xoo}, \quad (3)$$

где  $k_\lambda = 1$ ;

$c_{xoo}$  — значение принимается в соответствии с рис. В.17 СП 20.13330.2016 [4] в зависимости от числа Рейнольдса ( $Re$ ), определяемого по формуле 4, и от относительной шероховатости ( $\delta$ ), определяемой по формуле 5:

$$Re = 0,88d \sqrt{w_0 k(z_e) \gamma_f} \cdot 10^5, \quad (4)$$

где  $d$  — диаметр трубы, м;

$\gamma_f$  — коэффициент надежности по нагрузке;

$$\delta = \Delta / d, \quad (5)$$

где  $\Delta$  — шероховатость поверхности трубы в зависимости от обработки и материала.

Соответственно, было проведено аналитическое исследование отечественной научно-технической литературы, в результате которого выявлено отсутствие критериев оптимального выбора наиболее эффективных сечений труб с пониженным ветровым воздействием. При этом в литературе была указана область, называемая критической, при числе Рейнольдса, равном от  $1,8 \cdot 10^5$  до  $3,5 \cdot 10^5$ , в которой происходит падение значения аэродинамического коэффициента. Исходя из этого, отмечается, что при выборе труб в критической области

чисел Рейнольдса ветровое давление на цилиндр большего диаметра может быть меньше, чем на цилиндр меньшего диаметра [16].

Для подтверждения данной гипотезы, зададимся набором начальных параметров. Примем трубы по ГОСТ 10704-91 [17] в диапазоне диаметров от 20 до 377 мм со значением шероховатости поверхности элементов как для распыленной краски ( $\Delta = 2 \cdot 10^{-5}$  м) и внешним ветровым давлением  $w_0 = 0,38$  кПа местности типа А.

При анализе актуального графика значений ветровых сопротивлений для элементов круглого сечения, основанного на действующей нормативной документации и представленного в прил. В СП 20.13330.2016 (рис. В.17) [4], было выявлено некоторое изменение диапазона значений критических чисел Рейнольдса, границы которого составляют от  $1,2 \cdot 10^5$  до  $2,5 \cdot 10^5$ , что представлено в виде штриховой линии на рис. 1, также штрихпунктирными линиями отмечены промежуточные и крайние значения чисел Рейнольдса критической области.

Вычислим граничные и промежуточные значения диаметров труб в критической области чисел Рейнольдса по формуле 5, где значение  $\Delta = 2 \cdot 10^{-5}$  м (принято ранее), а значение  $\delta$  определяется по рис. В.17 прил. В СП 20.13330.2016 [4]. Аналогично, исходя из графика, определим граничные и промежуточные значения чисел Рейнольдса, находящихся в критической области. Все полученные данные сведем в табл. 1 для последующего анализа.

**ТАБЛИЦА 1. Диапазоны диаметров труб и чисел Рейнольдса в принятых границах относительных шероховатостей**

$\Delta/d$	0,05	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$d$ , мм	0,4	2,0	20,0	200,0	2000,0
$Re$	$1,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$

Откорректируем в соответствии с данной таблицей график, представленный на рис. В.17 прил. В СП 20.13330.2016, получим рис. 1.

Для ускорения процесса вычисления значений  $c_{x,\infty}$  для критических областей чисел Рейнольдса, представленных на рис. 1, была произведена аппроксимация кривой, обозначенной на графике штриховой линией, функция которой представлена формулой 6:

$$c_{x,\infty} = e^{10,90 + \frac{85247,33}{Re^*} - 0,98 \cdot \ln(Re^*)}, \quad (6)$$

где  $Re^*$  — число Рейнольдса критической области.

Вычислим диаметры труб исходя из принятых начальных параметров ветрового давления и типа местности, представленных в табл. 1 чисел Рейнольдса, а также высот  $z_e$ , находящихся в диапазоне от 5 до 100 м. Для этого, выразив  $d$  по формуле 4, получим формулу 7:

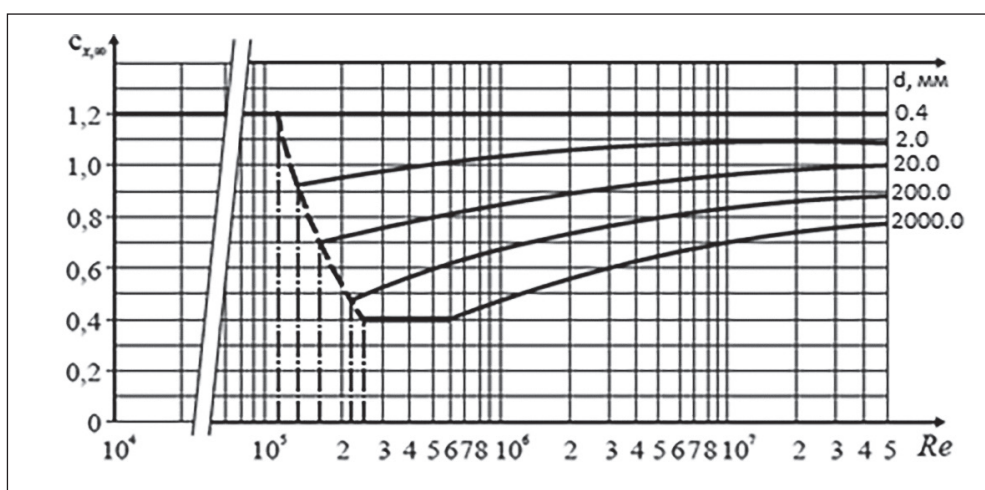
$$d = \frac{Re}{0,88\sqrt{w_0 k(z_e) \gamma_f} \cdot 10^5}. \quad (7)$$

Вычисленные значения диаметров труб представлены на рис. 2.

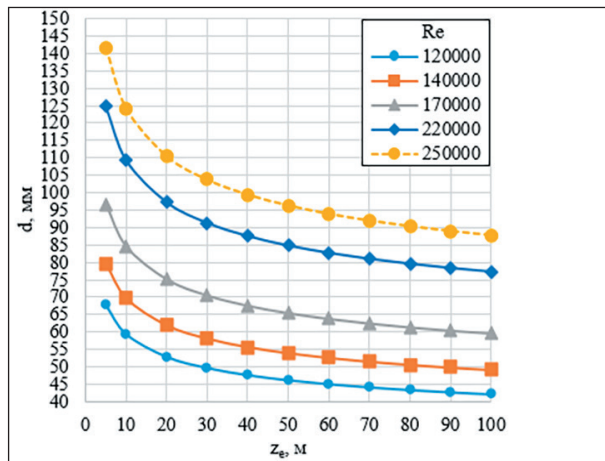
Произведем сверку данных графика, представленного на рис. 2, с граничными значениями диаметров труб и чисел Рейнольдса из табл. 1. Можно заметить, что все определенные сечения находятся в границах диаметров от 0,4 до 200 мм. Однако диаметры, получаемые при числе Рейнольдса, равном  $2,5 \cdot 10^5$ , не соответствуют заданным в табл. 1 граничным значениям. Соответственно, данные диаметры подлежат удалению, а график приобретает вид, представленный на рис. 3.

Применяя полученные ограничения для труб, выполняемых по ГОСТ 10704-91 [17], можно отметить, что соответствующий допустимый к использованию диапазон диаметров труб принимается равным от 42 до 114 мм.

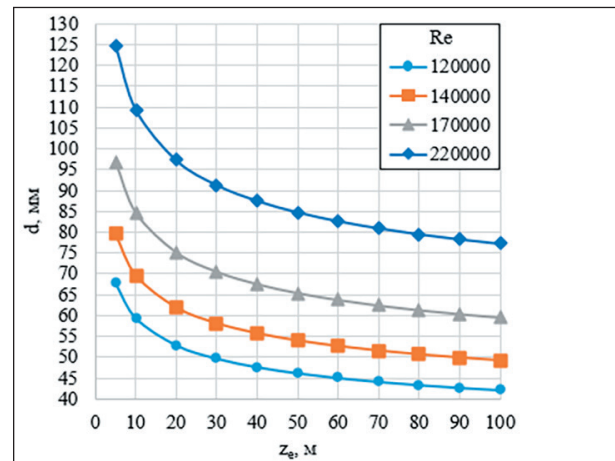
На рис. 1 штриховой и сплошными линиями, которые соответствуют граничным значениям диапазонов диаметров труб, обозначены кривые перехода критической области чисел Рейнольдса в закритическую, что отражено на рис. 4. Исходя из этого, значения аэродинамических коэффициентов труб диаметров, отличных от граничных значений диапазонов и при этом принадлежащих им, вычисляются



**Рис. 1.** Зависимость аэродинамического коэффициента трубы  $c_{x,\infty}$  от числа Рейнольдса ( $Re$ ) и  $d$  при шероховатости поверхности сечения  $\Delta = 2 \cdot 10^{-5}$  м



**Рис. 2.** Диаметры труб, удовлетворяющие числам Рейнольдса критической области



**Рис. 3.** Откорректированные допустимые диаметры труб, удовлетворяющие числам Рейнольдса критической области

линейной интерполяцией и располагаются в закритической области.

Приведем пример такого вычисления. Рассмотрим трубы диаметром 63,5 и 89 мм, для которых вычислим значения чисел Рейнольдса по формуле 4 для высот  $z_e$  в диапазоне от 5 до 100 м с принятыми ранее данными ветрового давления и типа местности. Полученные значения представлены в табл. 2. С целью более наглядного процесса определения значений  $c_{x_{\infty}}$  для выведенных данных локализуем представленный на рис. 1 график и получим рис. 5.

При дальнейшем анализе замечаем, что при значениях чисел Рейнольдса в диапазоне от точки А до точки Б, который соответствует границам кривой перехода для диаметров труб от 20 до 200 мм, значение аэродинами-

ческого коэффициента попадает в закритическую область чисел Рейнольдса. Из полученного графика можно определить точку перехода значения аэродинамических коэффициентов из критической в закритическую область. Значение числа Рейнольдса в этой точке составляет  $1,7 \cdot 10^5$ , что является верхней границей критической области для данного диапазона труб.

Применим полученные данные при вычислении значений чисел Рейнольдса для принятых ранее диапазона труб по ГОСТ 10704-91 [17] и прочих характеристик. Для критической области чисел Рейнольдса в выявленных выше границах от  $1,2 \cdot 10^5$  до  $1,7 \cdot 10^5$  получим представленный на рис. 6 график. Отметим, что трубы диаметром 102, 108 и 114 мм

**ТАБЛИЦА 2.** Значения чисел Рейнольдса

$z_e$	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Re при d, мм	63,5	$1,23 \cdot 10^5$	$1,42 \cdot 10^5$	$1,58 \cdot 10^5$	$1,68 \cdot 10^5$	$1,75 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^5$	$1,90 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^5$	$1,98 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^5$
	89	$1,56 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^5$	$2,00 \cdot 10^5$	$2,13 \cdot 10^5$	$2,22 \cdot 10^5$	$2,30 \cdot 10^5$	$2,36 \cdot 10^5$	$2,42 \cdot 10^5$	$2,47 \cdot 10^5$	$2,51 \cdot 10^5$	$2,55 \cdot 10^5$

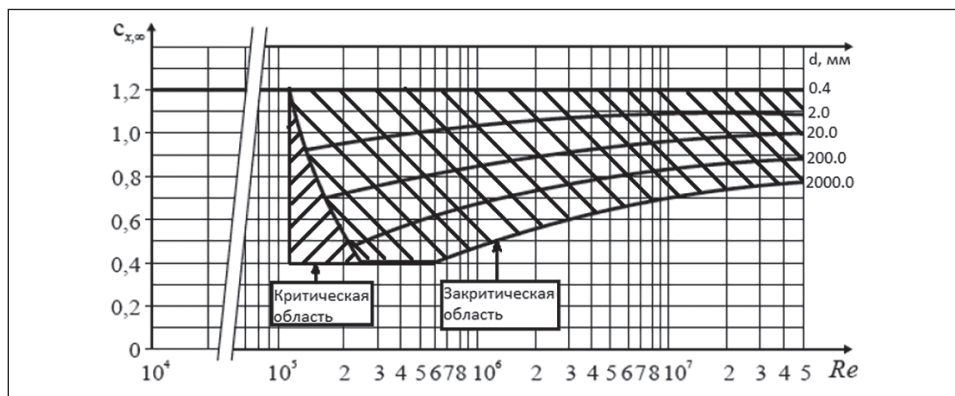


Рис. 4. Области чисел Рейнольдса для диаметров труб

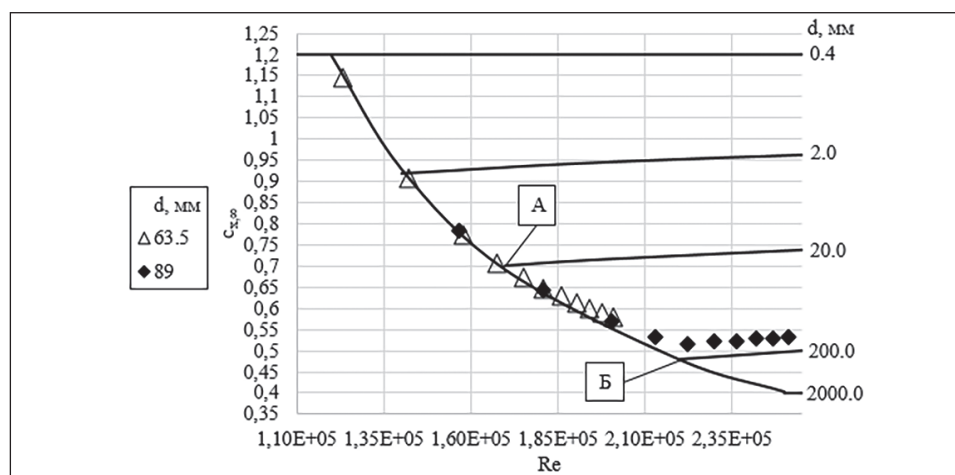


Рис. 5. Получение значений аэродинамических для труб диаметром 63,5 и 89 мм

не попали на рис. 6, так как значения чисел Рейнольдса данных сечений на минимальной отметке в 5 м превышают границы принятой области.

Воспользуемся полученными значениями чисел Рейнольдса ( $Re^*$ ) для определения значений аэродинамического коэффициента  $c_{x∞}$ , представленного на графике рис. В.17 прил. В СП 20.13330.2016 [4] и вычисляемого по формуле 6.

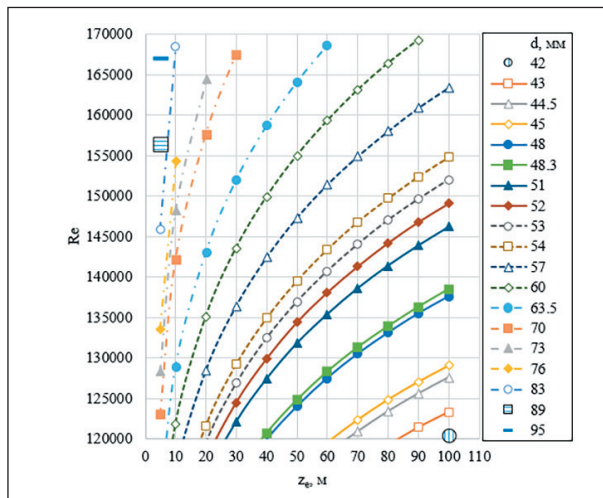
Далее вычислим значения ветрового давления на элементы единичной длины (1 м) преобразованием формулы 1 и получим формулу 8:

$$w_m = w_0 k(z_e) c_{x∞} A_i, \quad (8)$$

где  $A_i$  — площадь проекции трубы единичной длины.

Выведем полученные значения на рис. 7.

Исходя из графика, можно заметить значительную разницу ветрового давления на трубы единичной длины в зависимости от диаметра. Так, например, разница значений статической составляющей ветрового воздействия на отметке 90 м между трубами диаметром 43 и 60 мм при нагрузке 0,037 кН и 0,031 кН соответственно составляет 16%. Полученное значение разницы может являться основанием для принятия более оптимального типа сечения с точки зрения ветрового давления, что позволит значительно снизить его воздействие

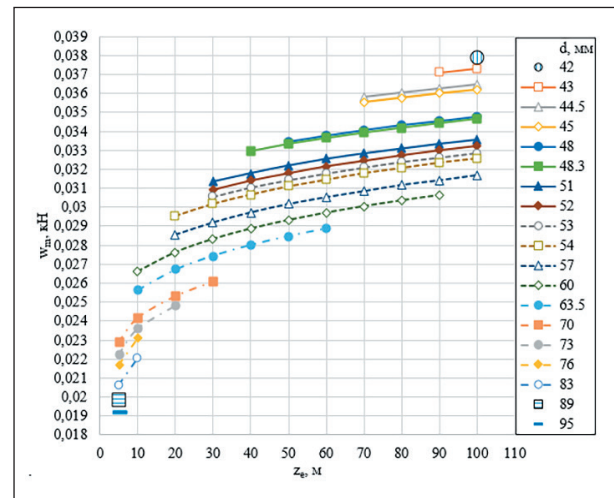


**Рис. 6.** График значений чисел Рейнольдса для диаметров труб в зависимости от высоты  $z_e$  и иных принятых ранее постоянных

на решетчатые конструкции и привести к значительному экономическому эффекту.

По итогам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Был проведен анализ отечественной научной-технической литературы по вопросу оптимизации элементов труб при ветровом давлении, в результате которого было выявлено отсутствие методов определения диапазона диаметров труб и конкретного эффекта от использования труб большего диаметра в диапазоне чисел Рейнольдса критической области.
2. Разработан авторский метод определения диапазона диаметра труб в числах Рейнольдса критической области.
3. Получена формула определения аэродинамического коэффициента критической области чисел Рейнольдса посредством аппроксимации графика зависимости аэродинамического коэффициента от числа Рейнольдса и относительной шероховатости.
4. Определена разница между значениями ветрового воздействия на элементы труб различного диаметра, работающих в области критических



**Рис. 7.** Значение статической составляющей ветровой нагрузки  $w_m$  на трубу единичной длины в зависимости от высоты  $z_e$

значений чисел Рейнольдса. Выявлено снижение величины ветрового воздействия на трубы большего диаметра и различие в воздействии на трубы меньшего диаметра, которое достигает 16 %.

### Список источников

1. Topology Optimisation of Lattice Telecommunication Tower and Performance-Based Design Considering Wind and Ice Loads / K. D. Tsavdaridis [et al.] // Structures. 2020. Vol. 27. Pp. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010
2. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2000. 45 с.
3. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев [и др.]; под общ. ред. А. В. Перельмутера. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2014. 588 с.
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с изм. № 1–6); утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 03.12.2016 № 891/пр (с изм. и доп.).

5. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б. Е. Масловой, А. В. Швецово́й. М.: Стройиздат, 1984. 358 с.
6. Пичугин С. Ф., Махинько А. В. Нормирование ветровой нагрузки на решетчатые опоры в стандартах разных стран мира // *Металлические конструкции*. 2009. Т. 15, № 4. С. 237–252.
7. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS / С. А. Исаев [и др.] // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 1 (36). С. 103–109. DOI: 10.5862/MCE.36.13.
8. Гостеев Ю. А., Обуховский А. Д., Саленко С. Д. Численное моделирование поперечного обтекания пролетных строений балочных мостов // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2018. Т. 18, № 4. С. 362–378. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378
9. Wind Tunnel Testing of Telecommunication Lattice Towers Equipped With Ancillaries / I. Calotescu [et al.] // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. P. 112526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112526
10. Research on Wind Load Characteristics on the Surface of a Towering Precast Television Tower with a Grid Structure Based on Large Eddy Simulation / P. Wu, G. Chen, R. Feng, F. He // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 9. P. 1428. DOI: 10.3390/buildings12091428
11. Reconstruction of Dynamic Wind Forces on a Transmission Steel Lattice Tower Using Aeroelastic Wind Tunnel Test Data / W. Zhang [et al.] // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 275. P. 115167. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115167
12. Estimation of Dynamic Wind Forces on a Steel Lattice Tower Based on Generalized Wind Force Spectra / W. Zhang [et al.] // *Structures*. 2023. Vol. 48. Pp. 1634–1650. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.073
13. Gust Response Factor of a Transmission Tower Under Typhoon / X. Fu [et al.] // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2020. Vol. 21, no. 01. P. 2150001. DOI: 10.1142/S0219455421500012
14. Соколов А. Г. Металлические конструкции антенных устройств. М.: Стройиздат, 1971. 240 с.
15. Перельмутер А. В. Задачи синтеза в теории сооружений (краткий исторический обзор) // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 2 (55). С. 70–106.
16. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт: статистика и динамика. М.: Связьиздат, 1953. 276 с.
17. ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент (введ. 01.01.1993). М.: Стандартинформ, 2007. 23 с.

Дата поступления: 26.02.2026

Решение о публикации: 17.04.2026

#### Контактная информация:

ВЕРЕМЕЕВ Дмитрий Валерьевич — аспирант;  
dmitry.veremeev@yandex.ru

ПЕГИН Павел Анатольевич — доктор техн. наук,  
профессор; PPavel@gmail.com

## Selection of the Optimal Value of Cylindrical Elements in Tower Structures

**D. V. Veremeev, P. A. Pegin**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Veremeev D. V., Pegin P. A. Selection of the Optimal Value of Cylindrical Elements in Tower Structures // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 417–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-417-426 (In Russian)

## Abstract

**Objective:** to identify the most efficient types of cylindrical cross-sections in accordance with the criterion of minimizing the wind effect on an element by studying the graph of aerodynamic coefficients for elements of this cross-section type presented in the current regulatory documentation, taking into account the accepted parameters of surface roughness, wind pressure values, and a set of heights relative to the ground surface. Application of the research results to existing types of cylindrical cross-sections manufactured in accordance with GOST. **Methods:** analysis of the existing scientific and technical literature touching upon the issue of experimental studies of the aerodynamic indicators of cylindrical cross-sections. Consideration of analytical expressions for calculating the wind effect on cylindrical cross-sections with their subsequent transformation to obtain intermediate values. Approximation of the curve of the graph of aerodynamic coefficients. **Results:** a technique has been developed for identifying the ranges of diameters of cylindrical cross-sections located in the critical region of Reynolds numbers. A formula for determining the aerodynamic coefficient in the critical Reynolds number region was obtained by approximating the curve of the graph of aerodynamic coefficients located on the boundary of the critical and postcritical Reynolds number regions. The difference between the wind effects on various pipe diameters was identified, and the resulting graph illustrates a reduction in wind effects on larger-diameter pipes. The difference with wind effects on smaller-diameter pipes can reach 16%. **Practical significance:** the possibility of using the derived method to obtain the most rational sections with a cylindrical surface shape based on the parameter of the least wind impact on the element, taking into account the accepted values of surface roughness and wind pressure, as well as the set of heights relative to the ground surface. The method allows for the development of more rational and cost-effective lattice structures for tower structures by reducing the wind impact on individual elements.

**Keywords:** tower, round element, cylindrical section, wind effect, aerodynamic coefficient, optimal pipe sections, load, lattice elements, Reynolds number

## References

1. Tsavdaridis K. D., et al. Topology Optimisation of Lattice Telecommunication Tower and Performance-Based Design Considering Wind and Ice Loads, *Structures*, 2020, vol. 27, pp. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010
2. Rekomendatsii po utochnennomu dinamicheskomu raschetu zdaniy i sooruzheniy na dejstvie pul'satsionnoj sostavlyayushchej vetrovoj nagruzki [Recommendations for the Refined Dynamic Analysis of Buildings and Structures Subject to the Action of the Pulsation Component of Wind Load] / *Moscow: TsNIISK im. V. A. Kucherenko [V. A. Kucherenko Central Scientific Research Institute for Building Structures]*, 2000, 45 p. (In Russian)
3. Gordeev V. N., et al. Nagruzki i vozdejstviya na zdaniya i sooruzheniya [Loads and Impacts on Buildings and Structures], general editorship by A.V. Perelmuter, 4th edition, revised and enlarged, Moscow, SKAD SOFT Publishing House, 2014. 588 p. (In Russian)
4. SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdejstviya [Loads and Impacts], updated version of SNiP 2.01.07-85\* (with Amendments No. 1-6); approved. By order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 3, 2016, no. 891/pr. (In Russian)
5. Simiu E., Scanlan R. Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind Impact on Buildings and Structures], trans. from English by B.E. Maslova, A.V. Shvetsova, Moscow, Stroyizdat, 1984, 358 p. (In Russian)
6. Pichugin S.F., Makhin'ko A.V. Normirovanie vetrovoj nagruzki na reshychatye opory v standartakh raznykh stran mira [Standardization of Wind Load on Lattice Supports in Standards Around the World], *Metallicheskie konstruktsii [Metal Structures]*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 237–252. (In Russian)
7. Isaev S.A., et al. Razrabotka i verifikatsiya mnogoblochnykh vychislitel'nykh tekhnologij dlya resheniya nestatsionarnykh zadach stroitel'noj aerodinamiki

vysotnykh zdaniy v ramkakh podkhoda URANS [Development and Verification of Multi-Block Computational Technologies for Solving Non-Stationary Problems of Structural Aerodynamics of High-Rise Buildings within the Framework of the URANS Approach], *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Journal of Civil Engineering]*, 2013, no. 1 (36), pp. 103–109. DOI 10.5862 / MCE.36.13 (In Russian)

8. Gostyev Yu. A., Obukhovskij A. D., Salenko S. D. Chislennoe modelirovanie poperechnogo obtekaniya proletnykh stroenij balochnykh mostov [Numerical Modeling of Transverse Flow Around the Superstructures Of Beam Bridges], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 362–378. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378 (In Russian)

9. Calotescu I., et al. Wind Tunnel Testing of Telecommunication Lattice Towers Equipped with Ancillaries, *Engineering Structures*, 2021, vol. 241, pp. 112–526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112526

10. Wu P., et al. Research on Wind Load Characteristics on the Surface of a Towering Precast Television Tower with a Grid Structure Based on Large Eddy Simulation, *Buildings*, 2022, vol. 12, no 9, p. 1428. DOI:10.3390/buildings12091428

11. Zhang W., et al. Reconstruction of Dynamic Wind Forces on a Transmission Steel Lattice Tower Using Aeroelastic Wind Tunnel Test Data, *Engineering Structures*, 2023, vol. 275, pp. 115–167. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115167

12. Zhang W., et al. Estimation of Dynamic Wind Forces on a Steel Lattice Tower Based on Generalized

Wind Force Spectra, *Structures*, 2023, vol. 48, pp. 1634–1650. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.073

13. Fu X., et al. Gust Response Factor of a Transmission Tower under Typhoon, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, vol. 21, no 01, p. 2150001. DOI: 10.1142/S0219455421500012

14. Sokolov A.G. Metallicheskie konstruksii antenykh ustrojstv [Metal Structures of Antenna Devices], Moscow, Stroyizdat, 1971, 240 p. (In Russian)

15. Perel'muter A.V. Zadachi sinteza v teorii sooruzhenij: kratkij istoricheskij obzor) [Synthesis Problems in the Theory of Structures: A Brief Historical Review)], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]*, 2016, no. 2 (55), pp. 70–106. (In Russian)

16. Savitskij G.A. Osnovy rascheta radiomacht: statistika i dinamika [Fundamentals of Radio Mast Calculation: Statics and Dynamics], Moscow, Svyazizdat, 1953, 276 p. (In Russian)

17. GOST 10704–91 Truby stal'nye elektrosvarnyye pryamoshovnyye. Sortament [Straight-Seam Electric-Welded Steel Pipes. Assortment], introduced January 01, 1993, Moscow, Standartinform, 2007, 23 p. (In Russian)

Received: February 26, 2026

Accepted: April 17, 2026

**Author's information:**

Dmitry V. VEREMEEV — Postgraduate Student;  
dmitry.veremeev@yandex.ru

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor;  
PPavel@gmail.com