



ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS

2023, ТОМ 29, НОМЕР 2, 83–92

EDN: KYMHZR

УДК 624.042.4

(23)-0390-1

УТОЧНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НА КРОВЛЮ И СТЕНКУ РЕЗЕРВУАРОВ С ПРОВИСАЮЩЕЙ КРОВЛЕЙ ПРИ ГРУППОВОМ РАСПОЛОЖЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ

В. Ф. Мушчанов¹, А. В. Зубенко², М. Н. Цепляев³

^а ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

*Российская Федерация, Донецкая Народная Республика,
286123, г. о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.*

E-mail: ¹volodymyr.mushchanov@mail.ru, ²a.v.zubenko@donnasa.ru, ³m.n.cepliaev@donnasa.ru

Получена 31 августа 2023; принята 22 сентября 2023.

Аннотация. В публикации рассматриваются аспекты нормирования ветрового давления и воздействия ветровой нагрузки на примере сооружений, имеющих круговую цилиндрическую поверхность, а именно вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов, состоящих в группе. Описывается уточненная методика нормирования ветровой нагрузки на элементы конструкций ВЦР для конструктивных решений с провисающей кровлей, и в одиночном расположении, и в группе. Представлены графики распределения аэродинамических коэффициентов для вертикальных цилиндрических резервуаров по высоте и для кровли. В результате с использованием верифицированного методического подхода для нормирования ветровых нагрузок на кровлю и стенку резервуаров с провисающей кровлей, а также на стенку и кровлю резервуаров, состоящих в группе, предложены расчетные формулы в виде одинарного и двойного тригонометрического рядов.

Ключевые слова: резервуар, провисающая кровля, цилиндрическая оболочка, ветровая нагрузка, аэродинамические коэффициенты.

УТОЧНЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ НА ПОКРІВЛЮ І СТІНКУ РЕЗЕРВУАРІВ З ПРОВИСАЛОЮ ПОКРІВЛЕЮ ПРИ ГРУПОВОМУ РОЗТАШУВАННІ РЕЗЕРВУАРІВ

В. П. Мушчанов¹, Г. В. Зубенко², М. М. Цепляєв³

ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

*Російська Федерація, Донецька Народна Республіка,
286123, м. о. Макіївський, м. Макіївка, вул. Державіна, буд. 2.*

E-mail: ¹volodymyr.mushchanov@mail.ru, ²a.v.zubenko@donnasa.ru, ³m.n.cepliaev@donnasa.ru

Отримана 31 серпня 2022; прийнята 22 вересня 2023.

Анотація. У публікації розглядаються аспекти нормування вітрового тиску і впливу вітрового навантаження на прикладі споруд, що мають кругову циліндричну поверхню, а саме вертикальних циліндричних резервуарів великих об'ємів, що входять до складу групи. Описується уточнена методика нормування вітрового навантаження на елементи конструкцій ВЦР для конструктивних рішень з провислою покрівлею, і в одиночному розташуванні, і в групі. Представлені графіки розподілу аеродинамічних коефіцієнтів для вертикальних циліндричних резервуарів по висоті і для покрівлі. В результаті з використанням верифікованого методичного підходу для нормування вітрових навантажень на покрівлю і стінку



резервуарів з провислою покрівлею, а також на стінку і покрівлю резервуарів, що входять до складу в групи, запропоновані розрахункові формули у вигляді одинарного і подвійного тригонометричного рядів.

Ключові слова: резервуар, провисла покрівля, циліндрична оболонка, вітрове навантаження, аеродинамічні коефіцієнти.

REFINEMENT OF AERODYNAMIC COEFFICIENTS FOR THE ROOF AND WALL OF TANKS WITH A SAGGING ROOF WITH A GROUP ARRANGEMENT OF TANKS

Volodymyr Mushchanov¹, Hanna Zubenko², Maxim Tcepliaev³

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,

Russian Federation, 286123, Makeevka, Derzhavin st., 2.

E-mail: ¹volodymyr.mushchanov@mail.ru, ²a.v.zubenko@donnasa.ru, ³m.n.cepliaev@donnasa.ru

Received 28 August 2023; accepted 22 September 2023.

Abstract. The publication discusses aspects of the normalization of wind pressure and the impact of wind load on the example of structures having a circular cylindrical surface, namely vertical cylindrical tanks of large volumes, consisting of a group. A refined method of rationing wind energy for structural elements of the VCR for structural solutions with a sagging roof, both in a single arrangement and in a group, is described. Graphs of the distribution of aerodynamic coefficients for vertical cylindrical tanks in height and for the roof are presented. As a result, using a verified methodological approach for the normalization of wind loads on the roof and wall of tanks with a sagging roof, as well as on the wall and roof of tanks consisting of a group, calculation formulas in the form of single and double trigonometric series are proposed.

Keywords: reservoir, sagging roof, cylindrical shell, wind load, aerodynamic coefficients.

Актуальность проводимых исследований

При проектировании зданий и сооружений чаще всего используются аэродинамические формулы, изложенные в нормативных документах [1, 5, 6]. Для несложных гидродинамических задач, таких как например расчет пограничного слоя найдено аналитическое решение. Работы по исследованию пограничного слоя принадлежат Hermann Schlichting, Frank M. White, А. В. Гарбарук и др. [2–4]. На основе работ А. Давенпорта и А. Вайза в 70-х годах XX века, в ЦНИИСК им. Кучеренко были разработаны методики по расчету ветровых нагрузок на здания и сооружения с использованием аэродинамических формул, реализованные в СНиП II-6-74 [7]. В 1985 г. при выпуске СНиП 2.01.07-85 [8] были упрощены выражения, описывающие динамическую реакцию сооружения при воздействии ветра. Однако расчет ветровой нагрузки с помощью формул нормативных документов требует детализации,

т. к. рассматриваются только частные случаи. В нормативных документах отсутствуют формулы для расчета вертикальных цилиндрических резервуаров с учетом рельефа местности и группирования сооружений в застройке. Нормирование ветровой нагрузки в действующих нормативных документах по определению ветрового воздействия на здания и сооружения для Российской Федерации, стран СНГ и стран объединенной Европы описан в [6]. Большой вклад в изучение воздействия ветра на здания и сооружения внес Г. А. Савицкий. В его работе [15] изложены основные вопросы расчета сооружений различного назначения на ветровую нагрузку. Даются общие сведения о структуре ветра и регламентированные данные о ветровой нагрузке. В работе С. Ф. Пичугина рассматриваются вопросы нормирования ветровых воздействий на здания и сооружения, проводится сравнение нормативных документов различных стран мира

[16]. Математическая модель гидродинамических процессов описана в работах В. Ф. Недопёкина [17–19]. G. Solari [20] иллюстрирует аналитическую модель для определения динамического отклика конструкций на воздействие ветра. Обсуждаются параметры модели с особым учетом оценки демпфирования и периода колебаний. Примеры поясняют оценку и роль демпфирования и периодов колебаний для расчета отклика конструкций при ветровых нагрузках. В работах G. Solari для консольных вертикальных конструкций [4] обсуждаются перспективы аналитических методов для оценки ветрового отклика конструкций, с учетом особенностей консольных вертикальных конструкций, [5] для вертикальных консольных конструкций определяется безразмерная величина, называемая 3-D эффектом ветровой нагрузки, которая создает такой эффект на любом уровне через широкий набор экспериментальных, численных и аналитических процедур.

Определение ветровой нагрузки на стенку и покрытие вертикального цилиндрического резервуара с провисающей кровлей

Воздействие нормативного ветра приводит к формированию на конструкциях сооружения результирующего распределения избыточного давления w . Осредненная по времени составляющая w_m этого распределения является важной характеристикой, используемой для определения сил и моментов ветрового воздействия при проведении прочностных расчетов на ветровое воздействие для проектируемого сооружения и элементов конструкций.

Проанализировав научные работы, для определения значения нормативных аэродинамических коэффициентов для стенки ВЦР была выбрана функция $C_{p0}(a, \beta)$, которая зависит от угловой координаты β и коэффициентов a , полученных путем аппроксимации функции (1):

$$C_{p0}(a, \beta) = \sum_{m=0}^n \left(a_m \cdot \cos\left(\frac{\beta m \pi}{180}\right) \right), \quad (1)$$

где β – угловая координата образующей поверхности стенки резервуара;

a_m – свободные члены зависимости $C_{p0}(a, \beta)$.

На рис. 1 показано сравнение нормативных значений аэродинамических коэффициентов,

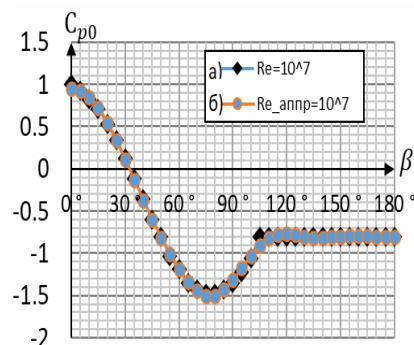


Рисунок 1. График нормативных значений аэродинамических коэффициентов: а) проинтерполированных по графику [1, 5]; б) полученных по формуле (1).

полученных по функциональной зависимости (1) и проинтерполированных при различных числах Рейнольдса для нормативной кривой [1, 5].

Коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,99$ для значений, полученных по формуле (1) и проинтерполированных по графику СП 20.13330.2016 [5], что показывает хорошую взаимосвязь для выбранной функции.

На рис. 2 изображена блок-схема формирования ветровой нагрузки для стенки отдельно стоящего резервуара по уточненной методике.

Аппроксимация целевой функции выполнялась в программном пакете для решения математических задач MathCAD 12 (Лицензия № TL51303) методом наименьших квадратов.

Значения аэродинамических коэффициентов для конструкций ВЦР только со сферическим покрытием рекомендуется определять по сечению вдоль ветрового потока для точек А, В и С при различных значениях соотношения высоты H к диаметру D и от соотношения стрелы подъема кровли f к диаметру резервуара по графикам [1, 5] (рис. 3). Величины аэродинамических коэффициентов не зависят от числа Рейнольдса.

Для определения уточненных значений нормативных аэродинамических коэффициентов для сферической кровли ВЦР предлагается использовать аналитическую зависимость $C_{p0}(a, \beta, x)$ от угловой координаты β , координат для радиального элемента x и коэффициентов a , полученных путем аппроксимации функции (1) и геометрических параметров резервуара:

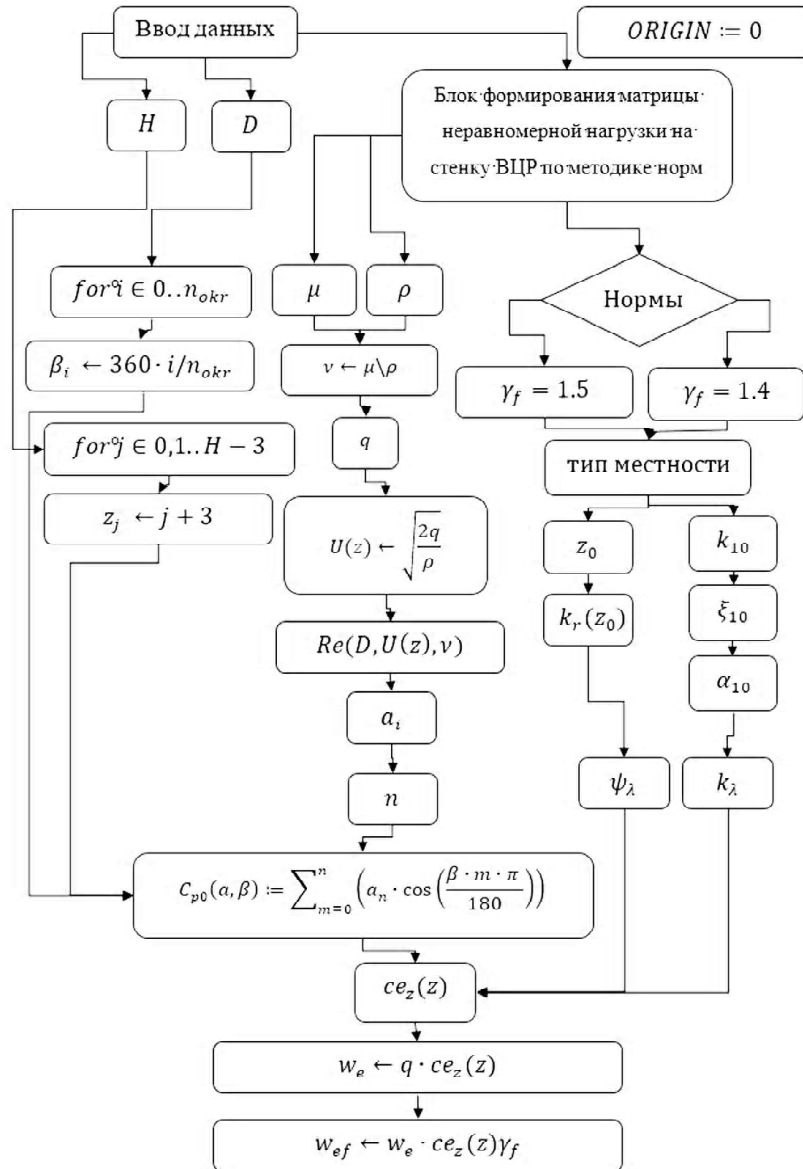


Рисунок 2. Блок-схема определения ветровой нагрузки на стенку отдельностоящего ВЦР: n_{okr} – количество точек по окружности, в которых определяются значения ветровой нагрузки, β – угловая координата образующей поверхности резервуара, μ – динамическая вязкость воздуха, ν – кинематическая вязкость воздуха.

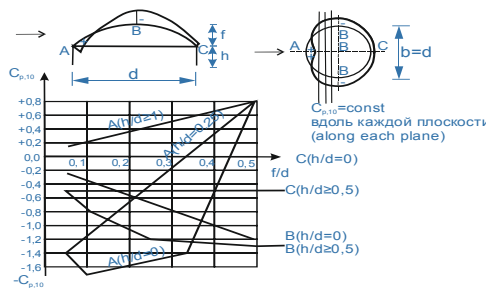


Рисунок 3. График для определения нормативных значений аэродинамических коэффициентов сферической кровли.

$$C_{p0} \left(a_k, X, \beta, \frac{H}{D}, \frac{f}{D} \right)_{i,j} = \sum_{k=0}^{k_1} a_k \cos \left(\frac{\pi \beta_j k}{180} \right) \left(\sum_{k=k_2}^{k_{21}} a_k \sin \left(\frac{\pi X_i (k-k_2)}{180} \right) \right) + \left(a_{k_3} \frac{H}{D} + a_{k_4} \frac{f}{D} \right). \quad (2)$$

где

a_k – свободные члены, определенные по результатам численного эксперимента;

β – угловая координата;

X – относительная координата, определяемая как X/D ;

$X_i = \cos \left(\frac{2\pi i}{cols(z)-1} \right)$; $cols(z)-1$ – количество

столбцов, зависит от шага угловой координаты; H/D – критерий соотношения высоты к диаметру ВЦР;

f/D – критерий соотношения стрелы подъема к диаметру ВЦР;

$k_1 = 5$; $k_2 = k + 1$; $k_{21} = k_2 + 4$; $k_3 = k_{21} + 1$; $k_4 = k_3 + 1$ – аппроксимационные коэффициенты.

В таблице показаны исходные аэродинамические коэффициенты C_{p0} для сферической кровли ВЦР с соотношением $H/D = 18/40$, $f/D = 1/9,2$, проинтерполированные по графикам норм [1, 5].

Определение ветровой нагрузки на стенку и покрытие вертикального цилиндрического резервуара с провисающей кровлей

Уточненные значения аэродинамических коэффициентов с учетом реального распределения ветрового потока для стенки ВЦР с провисающим покрытием, состоящего в группе, предлагается определять по формуле (3).

$$C_{p0} \left(a_k, z_h, \beta, \frac{H}{D}, \frac{f}{D} \right) = \left(\sum_{k=0}^k a_k \cos \left(\frac{\pi \beta k}{180} \right) + \sum_{k=k_1}^{k_{12}} a_k \sin \left(\frac{\pi \beta (k-k_1)}{180} \right) \right) \times \left(\sum_{k=k_2}^{k_{21}} a_k z_h^{(k-k_2)} \right) + \left(a_{k_3} \frac{H}{D} + a_{k_4} \frac{f}{D} \right) \quad (3)$$

где

a_k – свободные члены, определенные по результатам численного эксперимента;

β – угловая координата;

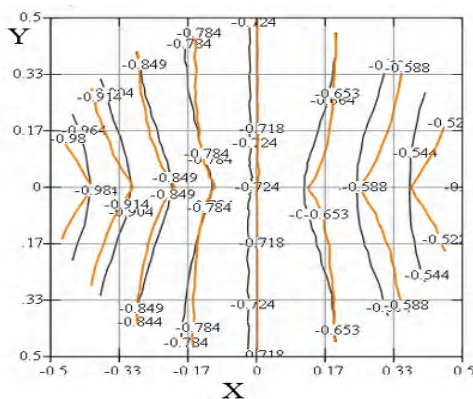
z_h – относительная высотная координата, определяемая как z/H ;

$z_{h_j} = \frac{j+3}{H}$, где $j = 0, 1 \dots (H-3)$;

$(H-3)$ – критерий, учитывающий равномерное распределение ветровой нагрузки на уровне 3 м от поверхности основания ВЦР;

H/D – критерий соотношения высоты к диаметру ВЦР;

а)



б)

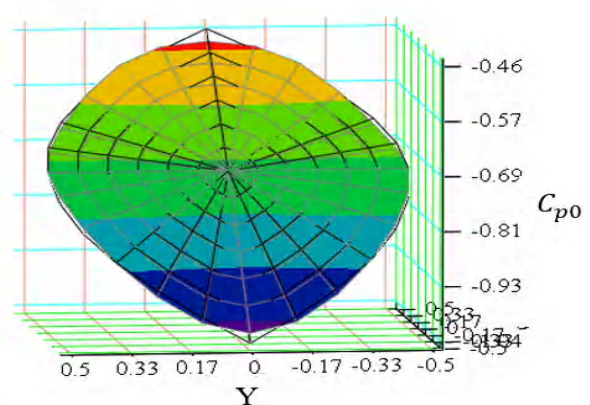


Рисунок 4. Сравнение нормативных значений аэродинамического коэффициента для ВЦР с соотношением $H/D = 18/40$, $f/D = 1/9,2$, полученные по формуле (2) и проинтерполированные по графику [1, 5]: а) контурный график функции аэродинамических коэффициентов C_{p0} по методике (цветным обозначены значения, взятые по нормам [1, 5]); б) объемный график функции аэродинамических коэффициентов C_{p0} по методике (цветным обозначены значения, полученные по методике [1, 5]).

f/D – критерий соотношения стрелы подъема к диаметру ВЦР;

$$k = 4; k_1 = k + 1; k_{12} = k_1 + 4; k_{21} = k_2 + 8; \\ k_3 = k_{21} + 1; k_4 = k_3 + 1.$$

На рис. 5 и 6 показаны сравнения значений аэродинамических коэффициентов, полученных для стенки ВЦР с провисающей кровлей в составе группы (расчетная схема № 11 при соотношениях $H/D = 18/40$; $f/D = 1/35$) со значениями, полученными в результате численного эксперимента.

Выводы

- 1) Для группы из четырех резервуаров на основе численного моделирования по полученным уточненным значениям аэродинамических коэффициентов ветрового давления для каждого из группы резервуаров методический подход, разработанный для нормирования, верифицирован путем сравнения данных по нагрузке на стенку и кровлю отдельно стоящего вертикального цилиндрического резервуара со сферическим покрытием.

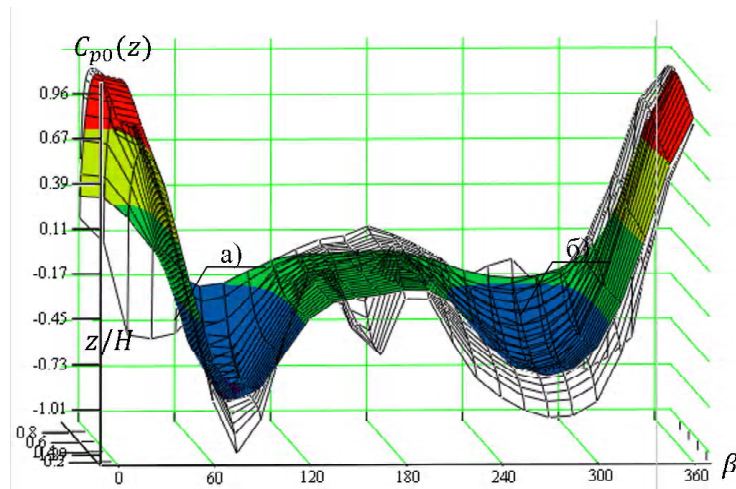


Рисунок 5. Схема распределения значений аэродинамических коэффициентов, полученных для стенки ВЦР с провисающей кровлей, состоящего в группе (расчетная схема 11): а) объемный график функции аэродинамических коэффициентов C_{p0} , полученных по результатам численного эксперимента (проволочный каркас без заливки); б) по методике.

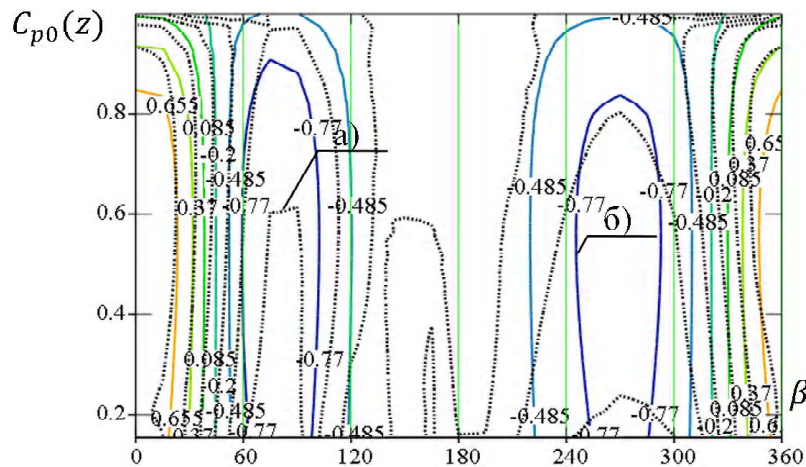


Рисунок 6. Схема распределения значений аэродинамических коэффициентов, полученных для стенки ВЦР с провисающей кровлей, состоящего в группе (расчетная схема 11): а) черный пунктир – контурный график функции аэродинамических коэффициентов C_{p0} , полученных по результатам численного эксперимента; б) цветной контур – по методике.

Таблица. Аэродинамические коэффициенты для сферической кровли ВЦР.

X	β°						
	0	60	120	180	240	300	360
0	-1,045	-0,828	-0,632	-0,457	-0,632	-0,828	-1,045
0,0833D	-0,991	-0,81	-0,646	-0,501	-0,646	-0,81	-0,991
D/6	-0,936	-0,791	-0,661	-0,544	-0,661	-0,791	-0,936
D/4	-0,882	-0,773	-0,675	-0,588	-0,675	-0,773	-0,882
D/3	-0,828	-0,755	-0,69	-0,632	-0,69	-0,755	-0,828
2D/5	-0,773	-0,737	-0,704	-0,675	-0,704	-0,737	-0,773
D/2	-0,719	-0,719	-0,719	-0,719	-0,719	-0,719	-0,719

Зафиксированное расхождение между нормативными значениями и значениями по предлагаемой аналитической зависимости составило не более 1,5 %.

- 2) С использованием верифицированного методического подхода для нормирования ветровых нагрузок на кровлю и стенку резервуаров с провисающей кровлей, а также на стенку и кровлю резервуаров, состоящих в группе, впервые предложены расчетные формулы

в виде одинарного и двойного тригонометрического рядов, которые наряду с другими известными преимуществами обеспечивают возможность алгоритмизации проводимых расчетов по определению ветровых нагрузок при анализе напряженно-деформированного состояния объектов с использованием метода конечных элементов, обеспечивающие в дальнейшем уточненную оценку НДС конструкций.

Литература

1. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–4. Загальні дії. Вітрові навантаження (EN 1991-1-4:2005, IDT) : національний стандарт України : надано чинності наказ Міністерства регіонального розвитку України від 27.12.2010 р. № 549 з 01.07.2013 : уведено вперше : чинні 2013-07-01 / переклад і науково-технічне редагування П. І. Бакін, В. Г. Поклонський, Р. В. Расюк [та ін.]. – Київ : Міністерство регіонального розвитку України, 2013. – 165 с. – Текст : непосредственный.
2. White, F. M. Viscous fluid flow / F. M. White. – Third Edition. – New York : McGraw-Hill, 2006. – 629 p. – ISBN 007-124493-X. – Текст : непосредственный.
3. Гарбарук, А. В. Простая алгебраическая модель турбулентности для расчета турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления / А. В. Гарбарук, Ю. В. Лапин, М. Х. Стрелец. – Текст : непосредственный // Теплофизика высоких температур. – 1999. – № 37(1). – С. 87–91.

References

1. DSTU-N B EN 1991-1-4:2010. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-4. General actions. Wind loads (EN 1991-1-4:2005, IDT) : national standard of Ukraine : put into effect by order of the Ministry of Regional Development of Ukraine dated 27.12.2010 No. 549 from 01.07.2013 : introduced for the first time : effective 07-01-2013 / translated and scientifically technical editing by P. I. Bakin, V. G. Poklonskyi, R. V. Rasiuk [and others]. – Kyiv : Ministry of Regions of Ukraine, 2013. – 165 p. – Text : direct. (in Ukraine)
2. White, F. M. Viscous fluid flow. – Third Edition. – New York : McGraw-Hill, 2006. – 629 p. – ISBN 007-124493-X. – Text : direct.
3. Harbaruk, A. V.; Lapin, Yu. V.; Strelets, M. Kh. A simple algebraic turbulence model for calculating a turbulent boundary layer with a positive pressure gradient. – Text : direct. – In: *Thermophysics of high temperatures*. – 1999. – № 37(1). – P. 87–91. (in Russian)

4. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory / H. Schlichting, K. Gersten. – Ninth Edition. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2017. – 805 p. – Текст : непосредственный.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. №891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. : дата введения 2017-06-04 / исполнители ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительства» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Москва : ФГБУ «РСТ», 2022. – 95 с. – Текст : непосредственный.
6. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування : затверджено та надано чинності Наказом Мінбуду України від 3 липня 2006 р. № 220 : замість СНиП 2.01.07-85 : введено вперше : надано чинності 2007-01-01 / розроблено Відкритим акціонерним товариством «Український науково-дослідний та проєктний інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського» (ВАТ Укрнідпроєктстальконструкція ім. В. М. Шимановського). – Київ : Мінбуд України, 2006. – 61 с. – Текст : непосредственный.
7. СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия : издание официальное : утверждён постановлением Госстроем СССР от 8 февраля 1974 г. №16 : взамен СНиП II-A.11-62; СН 318-65; СН 355-66 : дата введения 1974-09-01 / разработан ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1976. – 58 с. – Текст : непосредственный.
8. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия : издание официальное : утверждён постановлением Госстроя России от 29 мая 2003 г. № 45 : взамен главы СНиП II-6-74 : дата введения 1987-01-01 / разработан ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – Москва : ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с. – Текст : непосредственный.
9. Holmes, J. D. Wind loading of structures / J. D. Holmes. – Boca Raton, FL : CRC Press, 2015. – 412 p. – Текст : непосредственный.
10. Поддаева, О. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : учебное пособие / О. И. Поддаева, А. С. Кубенин, П. С. Чурин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Национально-исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва : НИУ МГСУ, 2015. – 86 с. – ISBN 978-5-7264-1194-1. – Текст : непосредственный.
11. Симиу, Э. Воздействия ветра на здания и сооружения : пер. с англ. / Э. Симиу, Р. Сканлан. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с. – Текст : непосредственный.
12. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : монография / Э. И. Реттер. – Москва : Стройиздат, 1984. – 294 с. – Текст : непосредственный.
4. Schlichting, H.; Gersten, K. Boundary-Layer Theory. – Ninth Edition. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2017. – 805 p. – Text : direct.
5. SP 20.13330.2016. Loads and actions: set of rules: approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Minstroy Rossii) dated December 3, 2016 No. 891/pr and entered into force on June 4, 2017 : date of introduction 2017-06-04 / performed by TsNIISK named after V. A. Kucherenko JSC «Stroitelstva Research Center» with the participation of FSBU «Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikova». – Moscow : FSBU «RST», 2022. – 95 p. – Text : direct. (in Russian)
6. DBN V.1.2-2:2006. System for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and influences. Design norms: approved and put into effect by the Order of the Ministry of Construction of Ukraine dated July 3, 2006 № 220: instead of SNiP 2.01.07-85 : introduced for the first time: put into effect on 01-01-2007 / developed by the Open Joint-Stock Company «Ukrainian Research and Design Institute of steel structures named after V. M. Shymanovsky» (JSC Ukrndiproektstalkonstruktziya named after V. M. Shymanovsky). – Kyiv : Ministry of Construction of Ukraine, 2006. – 61 p. – Text : direct. (in Ukraine)
7. SNiP II-6-74. Loads and impacts: official publication: approved by Decree of the USSR State Construction Committee dated February 8, 1974 No. 16: replacing SNiP II-A.11-62; SN 318-65 ; SN 355-66: date of introduction 1974-09-01 / developed by TsNIISK named after. V. A. Kucherenko. – Moscow : Stroyizdat, 1976. – 58 p. – Text : direct. (in Russian)
8. SNiP 2.01.07-85*. Loads and impacts : official publication : approved by the Decree of the State Construction Committee of Russia dated May 29, 2003 No. 45 : replacing the head of SNiP II-6-74: date of introduction 1987-01-01 / developed by TsNIISK im. Kucherenko State Construction Committee of the USSR. – Moscow : Federal State Unitary Enterprise TsPP, 2005. – 44 p. – Text : direct. (in Russian)
9. Holmes, J. D. Wind loading of structures. – Boca Raton, FL : CRC Press, 2015. – 412 p. – Text : direct.
10. Poddaeva, O. I.; Kubenin, A. S.; Churin, P. S. Architectural and construction aerodynamics : textbook ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, National Research Moscow State University of Civil Engineering. – Moscow : NRU MGSU, 2015. – 86 p. – ISBN 978-5-7264-1194-1. – Text : direct. (in Russian)
11. Simiu, E.; Scanlan, R. Impact of wind on buildings and structures : trans. from English. – Moscow : Stroyizdat, 1984. – 360 p. – Text : direct. (in Russian)
12. Retter, E. I. Architectural and construction aerodynamics: monograph. – Moscow : Stroyizdat, 1984. – 294 p. – Text : direct. (in Russian)

13. Коренева, Б. Г. Справочник по динамике сооружений / под редакцией профессора Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – Москва : Стройиздат, 1972. – 511 с. – Текст : непосредственный.
14. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1978. – 216 с. – Текст : непосредственный.
15. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – Москва : Стройиздат, 1972. – 111 с. – Текст : непосредственный.
16. Пичугин, С. Ветровая нагрузка на строительные конструкции : монография / С. Пичугин. – Полтава : АСМИ, 2005. – 342 с. – Текст : непосредственный.
17. Недопекин, Ф. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса при затвердевании слитков и отливок / Ф. Недопекин, В. Мелихов, В. Белоусов. – Текст : непосредственный // Процессы литья. – 1990. – № 2. – С. 15–20.
18. Недопекин, Ф. В. Моделирование гидродинамических и тепломассообменных процессов в металлургических технологиях / Ф. В. Недопекин, В. В. Белоусов. – Текст : непосредственный // Вестник Удмуртского университета. – 2008. – Выпуск 1. – С. 189–199.
19. Основы механики сплошных сред / Ф. В. Недопекин, А. А. Коваленко, В. И. Соколов [и др.]. – Луганск : Издательство ВНУ им. Даля, 2010. – 277 с. – Текст : непосредственный.
20. Solari, G. Evaluation and role of damping and periods for the calculation of structural response under wind loads / G. Solari. – Текст : непосредственный // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. – 1996. – Volume 59(2-3). – P. 191–210.
21. Solari, G. The role of analytical methods for evaluating the wind-induced response of structures / G. Solari. – Текст : непосредственный // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2002. – Volume 90(12-15). – P. 1453–1477.
22. Repetto, M. P. Equivalent static wind actions on vertical structures / M. P. Repetto, G. Solari. – Текст : непосредственный // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. – 2004. – Volume 92(5). – P. 335–357.
23. Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар / Р. Н. Степанов, Д. И. Роменский, В. Ф. Мушанов [и др.]. – Текст : электронный // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9, номер 6 (ноябрь – декабрь 2017). – 13 с. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf> (дата обращения: 20.08.2023).
13. Koreneva, B. G. Handbook on the dynamics of structures / edited by professor B. G. Korenev, I. M. Rabinovich. – Moscow : Stroyizdat, 1972. – 511 p. – Text : direct. (in Russian)
14. Guide to the calculation of buildings and structures for the action of wind / Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko. – Moscow : Stroyizdat, 1978. – 216 p. – Text : direct. (in Russian)
15. Savitsky, G. A. Wind load on structures. – Moscow : Stroyizdat, 1972. – 111 p. – Text : direct. (in Russian)
16. Pichugin, S. Wind load on building structures : monograph. – Poltava : ASMI, 2005. – 342 p. – Text : direct. (in Russian)
17. Nedopekin, F. Mathematical modeling of hydrodynamics and heat transfer during solidification of ingots and castings / F. Nedopekin, V. Melikhov, V. Belousov. – Text: direct // Casting processes. – 1990. – № 2. – P. 15-20. (in Russian)
18. Nedopekin, F. V.; Belousov, V. V. Modeling of hydrodynamic and heat and mass transfer processes in metallurgical technologies. – Text : direct. – In: *Bulletin of the Udmurt University*. – 2008. – № 1. – P. 189–199. (in Russian)
19. Nedopekin, F. V.; Kovalenko, A. A.; Sokolov, V. I. [et al.]. Fundamentals of continuum mechanics. – Lugansk : Publishing house VNU im. Dalia, 2010. – 277 p. – Text : direct. (in Russian)
20. Solari, G. Evaluation and role of damping and periods for the calculation of structural response under wind loads. – Text : direct. – In: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 1996. – Volume 59(2-3). – P. 191–210.
21. Solari, G. The role of analytical methods for evaluating the wind-induced response of structures. – Text : direct. – In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2002. – Volume 90 (12-15). – P. 1453–1477.
22. Repetto, M. P.; Solari, G. Equivalent static wind actions on vertical structures. – Text : direct. – In: *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 2004. – Volume 92(5). – P. 335–357.
23. Stepanov, R. N.; Romensky, D. I.; Muschanov, V. F. [et al.]. Wind load on a vertical cylindrical tank. – Text : electronic. – In: *Internet journal «Science Studies»*. – 2017. – Volume 9, № 6 (November – December 2017). – 13 p. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf> (date of access: 20.08.2023). (in Russian)

Мущанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины и Украинской академии наук, член-корреспондент академии архитектуры Украины. Научные интересы: теория надёжности, расчёт, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Зубенко Анна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, численные методы расчета тонких оболочек положительной гауссовой кривизны.

Цепляев Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчёт и проектирование вертикальных цилиндрических резервуаров повышение эффективности методик расчёта оболочек на устойчивость.

Мущанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» і міжнародної організації «Просторові конструкції», академік Академії будівництва України і Української академії наук, член-кореспондент Академії архітектури України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Зубенко Ганна Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження впливу вітрового навантаження на споруди, що мають кругову циліндричну поверхню, чисельні методи розрахунку тонких оболонок позитивної гауссової кривизни.

Цепляєв Максим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування вертикальних циліндричних резервуарів підвищення ефективності методик розрахунку оболонок на стійкість.

Mushchanov Volodymyr – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures», the academician of the Civil Engineering Academy in Ukraine and the Academy of Sciences of Ukraine, an associate member of the Academy of Architecture of Ukraine. Scientific interests: the reliability theory, analyze, designing and engineering diagnostics of spatial metallic structures.

Zubenko Hanna – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: study of the impact of wind loads on structures with a circular cylindrical surface, numerical methods for calculating thin shells of positive Gaussian curvature.

Maxim Tsepliaev – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: calculation and design of vertical cylindrical tanks, increasing the efficiency of shell calculation methods for stability.