



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2011, ТОМ 17, НОМЕР 2, 135–142

УДК 624.97

(11)-0239-1

РОЗРАХУНОК ТРУБЧАСТИХ СТЕРЖНІВ БАШТ НА АЕРОДИНАМІЧНУ НЕСТІЙКІСТЬ

В. В. Губанов, Ю. М. Удод, Д. В. Чебурей

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: julia.u.inform@gmail.com*

Отримана 15 квітня 2011; прийнята 22 квітня 2011.

Анотація. В статті проаналізовано стан питання і виконаний розрахунок трубчастих стержнів башт на аеродинамічну нестійкість відповідно до запропонованої методики і Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions, розроблено практичний спосіб визначення динамічної сили, яка впливає на шарнірно-закріплений та жорстко-закріплений елемент по номограмі, залежно від діаметру, довжини і товщини труб. Представлена номограма для труб електрозварних прямошовних по ГОСТ 10704-91 діаметром 60–102 мм для визначення перерізів елементів, у яких не виникає вітрової резонанс, на етапі прийняття основних конструктивних рішень.

Ключові слова: трубчастий елемент башти, вітрове навантаження, резонанс, динамічна сила, вихрове збудження.

РАСЧЕТ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ БАШЕН НА АЭРОДИНАМИЧЕСКУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

В. В. Губанов, Ю. Н. Удод, Д. В. Чебурей

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: julia.u.inform@gmail.com*

Получена 15 апреля 2011; принята 22 апреля 2011.

Аннотация. В статье проанализировано состояние вопроса и выполнен расчет трубчатых стержней башен на аэродинамическую неустойчивость в соответствии с предложенной методикой и Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions, разработан практический способ определения динамической силы, действующей на шарнирно-закрепленный и жестко-закрепленный элемент по номограмме, в зависимости от диаметра, длины и толщины труб. Представлена номограмма для труб электросварных прямошовных по ГОСТ 10704-91 диаметром 60–102 мм для определения сечений элементов, в которых не возникает ветровой резонанс, на этапе принятия основных конструктивных решений.

Ключевые слова: трубчатый стержень башни, ветровая нагрузка, резонанс, динамическая сила, вихревое возбуждение.

DESIGN OF TUBULAR CORES OF TOWERS FOR THEIR AERODYNAMIC INSTABILITY

Gubanov Vadim, Udod Iuliia, Cheburey Darya

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.

E-mail: julia.u.inform@gmail.com

Received 15 April 2011; accepted 22 April 2011.

Abstract. In article the condition of a question is analyzed and tubular cores of towers for their aerodynamic instability have been designed according to the offered technique and Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions and the practical way of defining of the dynamic force influencing the merely fixed and rigid fixed element under the nomogram, depending on diameter, length and thickness of pipes also is developed. The nomogram for electric welded straight line pipes in accordance with GOST with 60–102 mm diameter to define sections of elements where there is no wind resonance, at a stage of acceptance of the basic constructive decisions is presented.

Keywords: a tubular core of a tower, wind loading, a resonance, dynamic force, whirl excitation.

Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными практическими задачами

В настоящее время в промышленности широко распространено использование решетчатых башен. Основными нагрузками для этих сооружений являются воздействия ветра и веса конструкций, величина которых находится в прямой зависимости от размеров и типов сечений всех его элементов, вследствие чего выбор формы сооружения и отдельных его элементов играет существенную роль [1], [2]. Расчетная ветровая нагрузка для высоких сооружений определяется с учетом динамического воздействия пульсаций скоростного напора, вызываемых порывами ветра [4]. Кроме динамического расчета такого сооружения на действие турбулентного ветра необходим расчет на резонанс [6], т. к. при обтекании сооружений цилиндрической формы плоскопараллельным потоком ветра в области за сооружением образуется вихревая дорожка с шахматным расположением вихрей и при определенных скоростях ветра частота срыва вихрей совпадает с собственной частотой сооружения и возникают резонансные колебания.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы

Этой задаче посвящено много исследований [3], [5], [6], [7], [8], [10], [11], тем не менее в настоящее время мы ещё не располагаем достаточно обоснованной теоретической моделью этого явления.

В последних исследованиях на аэродинамическую неустойчивость решетчатых башен приводится анализ динамического поведения башенных конструкций [6], в котором установлено, что анализу следует подвергать как башню в целом, так и её конструктивные элементы в отдельности. При выполнении подбора сечений элементов будут актуальны инженерные методики определения воздействующей динамической силы на отдельный элемент решетки башни. Подобные вопросы затрагиваются в работе [5].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья

Из вышеизложенного видно, что наряду с детальной проработкой методов расчета на

аэродинамическую неустойчивость, отсутствует методика определения динамической силы с учетом влияния резонансных колебаний на отдельный элемент решетки.

Поэтому **целью** данной работы является разработка методики определения динамической силы, воздействующей на отдельный трубчатый элемент башни, которая позволила бы на этапе принятия основных конструктивных решений определиться с выбором сечений, в которых не возникает ветровой резонанс.

Изложение основного материала исследования

Методика заключается в практическом способе определения динамической силы, воздействующей на шарнирно-закрепленный и жестко-закрепленный элемент трубчатого сечения по номограмме.

Проверка на резонанс выполнялась для шарнирно-закрепленных и жестко-закрепленных элементов из труб электросварных прямошовных по ГОСТ 10704-91, диаметрами 60, 76, 83, 89, 102, различной длины и толщины. Расчет проводится в тех случаях, когда критическая скорость ветра находится в пределах $0,64\sqrt{q_0} \leq v_{кр,i} \leq 30$ м/с. При $v_{кр,i} \geq 0,64\sqrt{q_0}$, усилия в сооружении при резонансе всегда меньше усилий при расчете в направлении действия ветра; скорость 30 м/с принята в качестве верхней границы критической скорости для всех географических районов Украины.

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Определяется погонная масса элемента:

$$m = \frac{\pi(d-t) \cdot t \cdot \rho}{1000}, \text{ [кг/м]} \quad (1)$$

где d – диаметр элемента, м; t – толщина, мм; ρ – плотность стали 7,85 кг/м³.

2. Определяется критическая скорость ветра, вызывающая резонансные колебания элемента в направлении, перпендикулярном ветровому потоку:

$$v_{кр,i} = \frac{d}{Sh \cdot T_i}, \text{ [м/с]} \quad (2)$$

где $T_i = 1/f$ – период собственных колебаний элемента по i -ой форме для определенного варианта закрепления, с; Sh – число Струхала поперечного сечения (для круга $Sh=0,2$).

3. Определяется динамическая сила, воздействующая на элемент:

$$Q_o = F_i \cdot \frac{\pi}{\sigma}, \text{ [Н/м]} \quad (3)$$

где δ – логарифмический декремент колебаний; $F_i = c \cdot d \cdot W_i$ – расчетная статическая составляющая ветровой нагрузки по направлению действия ветра, где c – аэродинамический коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса (если $Re < 10^5$, то $c=1,3$; если $2 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^5$, то $c=0,6$; если $Re > 4 \cdot 10^5$, то $c=0,2$), определенного по формуле:

$$Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot k(z) \cdot \gamma} \cdot 10^5, \quad (4)$$

где $W_i = 0,613 \cdot v_{кр,i}^2$ – скоростной напор, Па, соответствующий критической скорости ветра.

4. Изгибающий момент от приложенной силы определяется по формуле (5):

$$M = \frac{Q_o \cdot l^2}{8}, \text{ [Н/м]}. \quad (5)$$

С помощью этой методики были проанализированы элементы с различными диаметрами, длинами и толщинами и построены номограммы, состоящие из 4-х графиков (рис. 1...4) для жесткого закрепления элемента. По этим графикам последовательно определяются: погонная масса элемента, в зависимости от диаметра и толщины трубы; критическая скорость ветра, в зависимости от погонной массы и длины элемента; динамическая сила, в зависимости от критической скорости ветра и диаметра трубы; изгибающий момент, в зависимости от динамической силы и длины элемента.

Пример использования номограммы

Требуется определить динамическую силу и напряжение в элементе трубчатого сечения $76,0 \times 1,5$ и длиной 2 м с жестким закреплением, $W_0=450$ Па (для второго ветрового района), $\gamma_i=0,95$ (50 лет – срок службы сооружения). На графике 1 на прямой, соответствующей толщине 1,5 мм, находим точку при $D=76$ и через неё проводим горизонталь, пересечение которой с вертикальной осью определяют величину погонной массы $P=2,76$ кг/м. Далее по той же горизонтали на графике 2 на прямой 2 (76), где 2 – длина и 76 – диаметр элемента, получаем значение 14,44 м/с. Затем на графике 3 находим

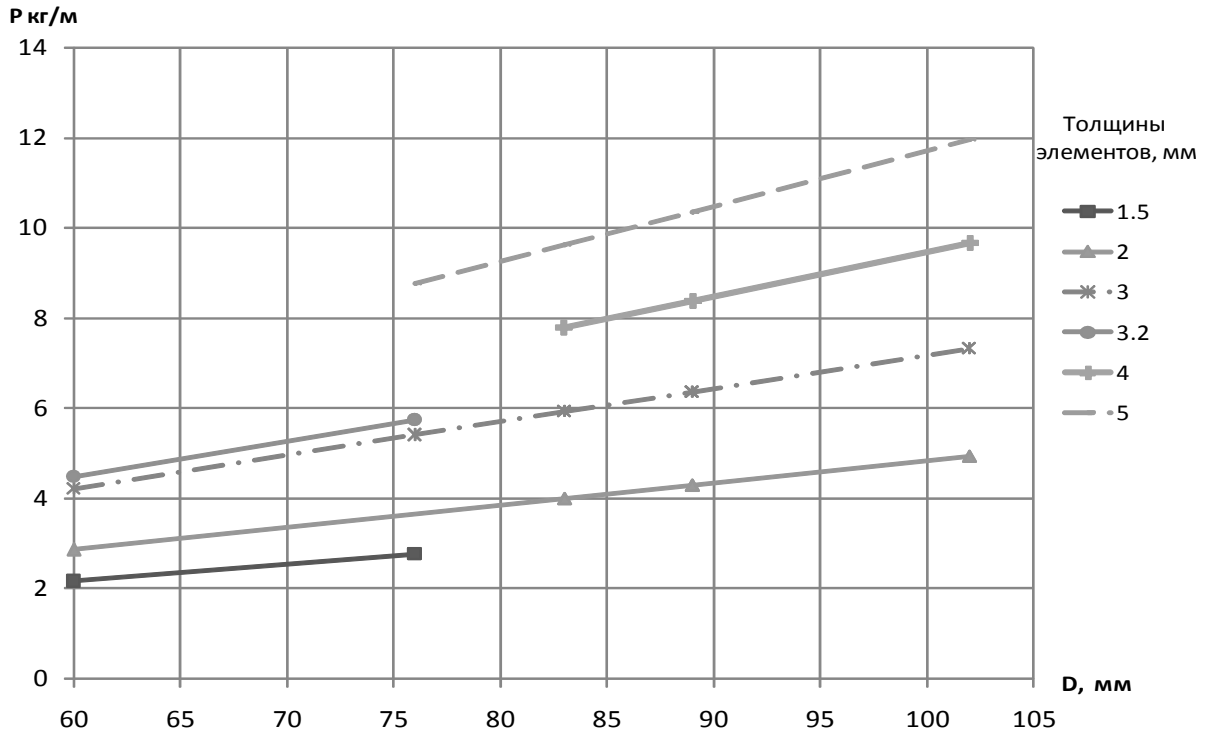


Рисунок 1. Зависимость погонной массы элемента от его толщины для сечений диаметром 60–102 мм.

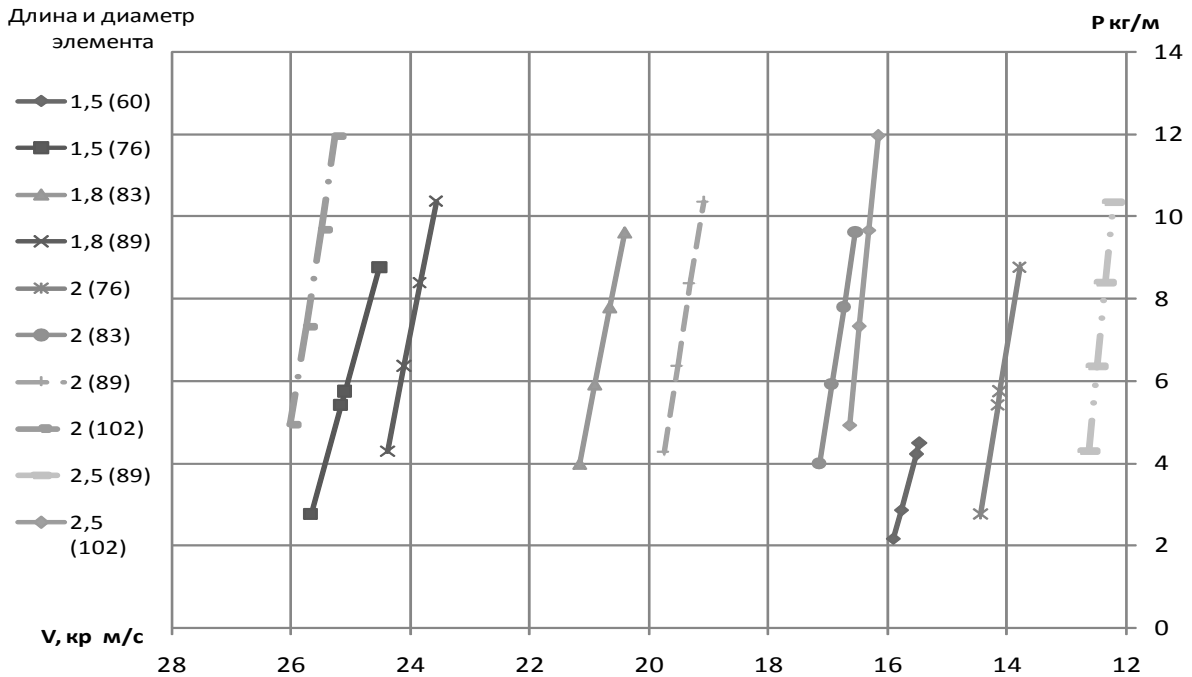


Рисунок 2. Зависимость критической скорости ветра для элемента от его погонной массы и длины для сечений диаметром 60–102 мм.

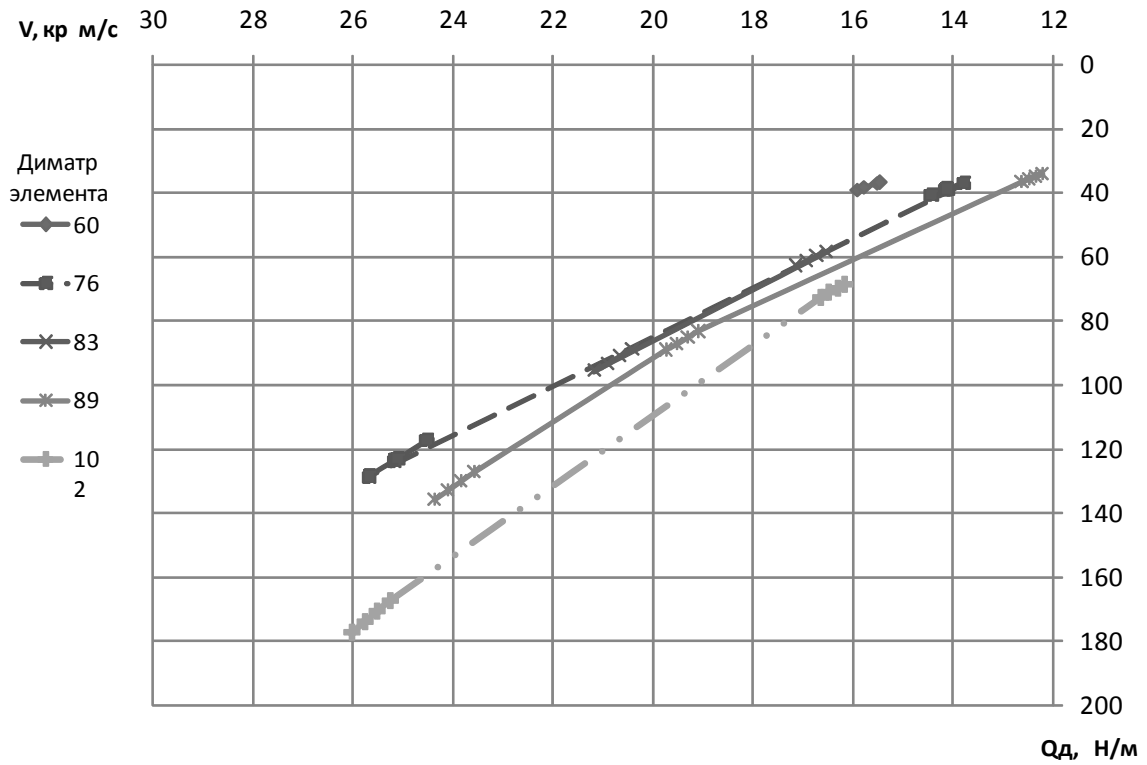


Рисунок 3. Зависимость динамической нагрузки на элемент от критической силы ветра для сечений диаметром 60–102 мм.

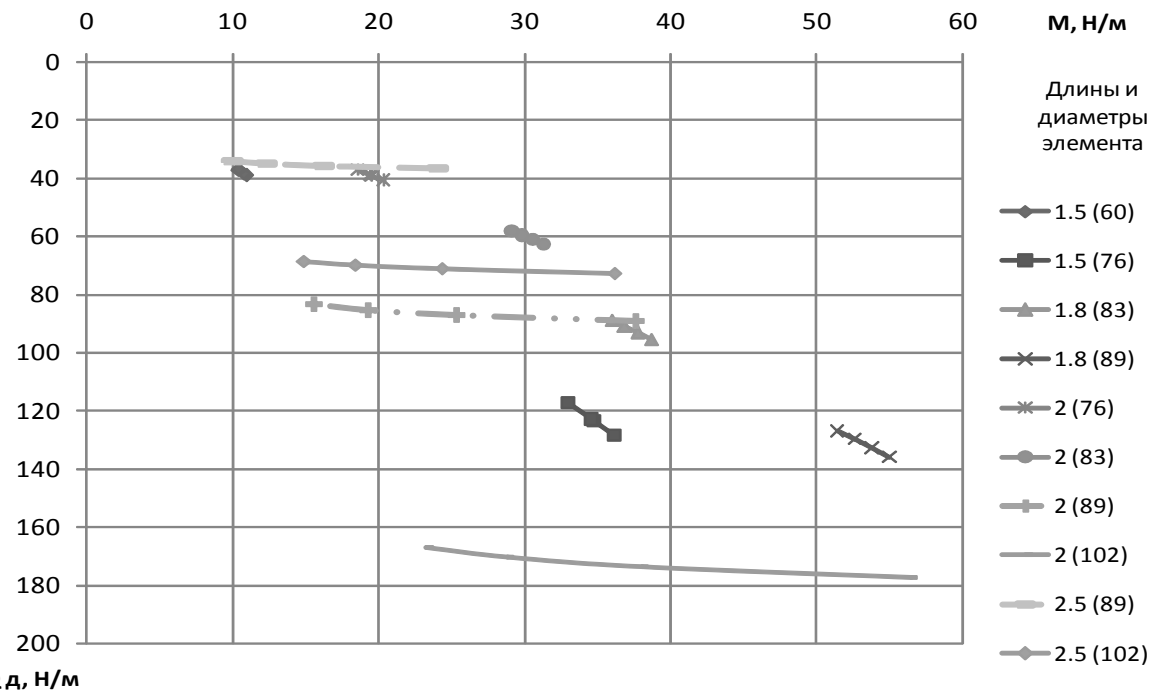


Рисунок 4. Зависимость изгибающего момента в элементе от приложенной динамической нагрузки для сечений диаметром 60–102 мм.

точку, соответствующую значению 14,44 м/с на кривой для элемента диаметром 76 мм и проводим горизонталь до соединения с вертикальной осью, чтобы определить значение динамической силы 40,67 Н/м. На графике 4 по той же горизонтали на кривой 2 (76) получаем значение изгибающего момента элемента 20,34 Н/м.

В качестве примера приводится номограмма для элементов диаметром 60–102 мм для жесткого закрепления элемента.

При выполнении расчетов согласно [9] по сравнению с предлагаемой методикой вводятся не только ограничение по критической скорости, но и по соотношению длины к диаметру, т. е. для недопущения явления резонанса в элементах сооружения вводятся требования на соответствие критериям: $v_{crit,l} > 1,25v_m$ и $l/d > 6$.

Далее определяется нагрузка, которая возникает вследствие вихревого возбуждения. Нагрузки вследствие колебаний от вихревого возбуждения рассчитывают из сил инерции системы. Силы инерции на единицу длины $F_w(s)$, которые действуют на конструкцию нормально направлению действия ветра в месте s , могут рассчитываться по формуле:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2\pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \quad (6)$$

где $m(s)$ – колеблющаяся масса конструкции, отнесенная к длине, кг/м; $n_{i,y}$ – собственная частота i -ой формы колебаний конструкции; $\Phi_{i,y}(s)$ – форма колебаний конструкции, нормированная к единице в точке с максимальным

перемещением (амплитудой колебаний); $y_{F,max}$ – максимальное перемещение во времени (амплитуда колебаний) в точке с $\Phi_{i,y}(s)$, равным единице.

Амплитуда колебаний определяется по формуле:

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \quad (7)$$

где St – число Струхала; Sc – число Скрудона; K_w – коэффициент приведенной длины; K – коэффициент формы колебаний; c_{lat} – аэродинамический коэффициент вихревого возбуждения.

При проверке на резонанс для шарнирно-закрепленных и жестко-закрепленных элементов из труб электросварных прямошовных по ГОСТ 10704-91, диаметрами 60, 76, 83, 89, 102, различной длины и толщины согласно [9] исследовать на данное воздействие нет необходимости.

Выводы

1. В результате проделанной работы была построена номограмма для отдельных трубчатых элементов башни с учетом резонансных колебаний, которая позволяет подобрать сечение элемента башни, избегая возникновения ветрового резонанса.
2. Необходимо выполнить разработку способа по определению динамической силы для элементов с учетом гололедных отложений, которые изменяют массу элементов.

Литература

1. Державні будівельні норми. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – Замість СНиП 2.01.07-85; надано чинності 2007-01-01. – К.: Мінбуд України, 2006. – 61 с.
2. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции: СНиП II-23-81*. – Взамен СНиП II-B.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67; введ. 1982-01-01. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
3. Солодарь, М. Б. Металлические конструкции вытяжных башен / М. Б. Солодарь. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. – 186 с.
4. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. – Москва: Наука, 1967. – 444 с.
5. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / Центр. науч.-исслед. ин-т строит.

References

1. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects: DBN B.1.2-2:2006. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
2. Structural Rules and regulations. Steel structures: SNiR II-23-81*. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 90 p. (in Russian)
3. Solodar, M. B. Metal structures of extract towers. Leningrad: Stroiizdat, Leningr. otd-nie, 1975. 186 p. (in Russian)
4. Timoshenko, C. P. Vibration in engineering. Moscow: Nauka, 1967. 444 p. (in Russian)
5. Manuals to design buildings and structures due to wind influence. Moscow: Stroiizdat, 1978. 216 p. (in Russian)

- конструкций им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1978. – 216 с.
6. Горохов, Е. В. Оценка влияния конструктивных особенностей решетчатых башен на их динамическое поведение / Е. В. Горохов, М. В. Бусько, С. В. Турбин // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, ДонНАБА. – 2007. – Вип. 6 (68) : Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 112–119.
 7. Губанов, В. В. К вопросу об инженерных методах определения ветровой реакции при обследовании / В. В. Губанов, А. Н. Гибаленко // Вісник Донбаської держ. академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць / М-во освіти України, ДонДАБА. – 1999. – Вип. 6(20) : Будівельні конструкції, будівлі та споруди. Т. 2. Інженерні питання впливу вітру на споруди. – С. 44–46.
 8. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1980. – 776 с. – (Справочник проектировщика).
 9. EUROCODE 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions. Wind actions. – 148 p.
 10. Smith, B. W. (1937). Communication structures / Brian W. Smith. – London : Thomas Telford, 2007. – 338 p.
 11. ASCE Task Committee on the Dynamic response of Lattice Towers. Murty K.S. Madugula (ed). Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts. ASCE – Structural Engineering Institute, 2001. – 266 p.
 6. Gorokhov, Ye. V.; Busko, M. V.; Turbin, S. V. Influence analysis of constructive peculiarities of grid towers upon its dynamic operation. *In compendium Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2007, Vol. 6(68): Towers: building materials, structures, processes, p. 112–119. (in Russian)
 7. Gubanov, V. V.; Gibalenko, A. N. Engineering methods of wind reaction determination while inspection. *In compendium Proceeding of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 1999, Vol. 6(20): Structures, buildings and constructions. Vol. 2. Engineering problems of wind influence upon buildings, p. 44-46. (in Russian)
 8. Metal Constructions. Ed. N. P. Melnikov. Moscow: Stroizdat, 1980. 776 p. (Reference designer). (in Russian)
 9. EUROCODE 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions. Wind actions. 148 p.
 10. Smith, B. W. (1937). Communication structures. London: Thomas Telford, 2007. 338 p.
 11. ASCE Task Committee on the Dynamic response of Lattice Towers. Murty K.S. Madugula (ed). Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts. ASCE – Structural Engineering Institute, 2001. 266 p.

Губанов Вадим Вікторович – к.т.н., доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Інституту інженерів будівельників, Великобританія. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, розрахунок та проектування висотних споруд.

Удод Юлія Миколаївна – аспірант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: будівельна аеродинаміка, вітрові навантаження на будівлі та споруди, надійність, ґратчасті башти.

Чебурей Дар'я Василівна – студентка кафедри металевих конструкцій, бакалавр будівництва Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок баштових споруд на аеродинамічну нестійкість.

Губанов Вадим Вікторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Института инженеров строителей, Великобритания. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, расчет и проектирование высотных сооружений.

Удод Юлия Николаевна – аспирант кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: строительная аэродинамика, ветровые нагрузки на здания и сооружения, надежность, решетчатые башни.

Чебурей Дарья Васильевна – студентка кафедры металлических конструкций, бакалавр строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет башен, аэродинамическая неустойчивость.

Gubanov Vadim – Ph. D. (Eng.), associate professor of the department of Metal Structures of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Member of Construction Engineers Institute, Great Britain. Scientific interests: operation reliability of building metal structures, high building design.

Udod Iuliia – a post graduate student of the department «Metal Structures» of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: construction aerodynamics, wind loadings on buildings and structures, reliability, lattice towers.

Cheburey Darya – a student of the department of Metal Structures of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: tower design, aerodynamic instability.