



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2016, ТОМ 22, НОМЕР 2, 91–97

УДК 624.048:624.074.433

(16)-0345-1

МОДЕЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Г. В. Зубенко, А. О. Дроздов

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

E-mail: zubienko_anna@mail.ru

Отримана 30 березня 2016; прийнята 27 травня 2016.

Анотація. У даній статті розглядаються результати модельних випробувань для вертикальних циліндричних резервуарів об'ємом 20 тис. м³. Так як недостатньо вивчені навантаження для споруд із співвідношенням висоти до ширини менш ніж 0,5, що перебувають у групі, тому було проведено ряд випробувань в аеродинамічній трубі для моделей з різною формою покрівлі. У статті розглядаються результати верифікації численних досліджень для тестової однієї моделі з плоскою покрівлею. Результати по об'єкту, що знаходиться в групі, будуть надані у наступній статті.

Ключові слова: аеродинамічна труба, аеродинамічний коефіцієнт, вертикальний циліндричний резервуар.

МОДЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. В. Зубенко, А. А. Дроздов

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

E-mail: zubienko_anna@mail.ru

Получена 30 марта 2016; принята 27 мая 2016.

Аннотация. В данной статье рассматриваются результаты модельных испытаний для вертикальных цилиндрических резервуаров объемом 20 тыс. м³. Так как недостаточно изучены нагрузки для сооружений с соотношением высоты к ширине менее 0,5, состоящих в группе, поэтому был проведен ряд испытаний в аэродинамической трубе для моделей с различной формой кровли, состоящих в группе. В статье рассматриваются результаты верификации численных исследований для тестовой одной модели с плоской кровлей. Результаты по объекту, состоящему в группе, будут представлены в следующей статье.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, аэродинамический коэффициент, вертикальный цилиндрический резервуар.

THE MODEL TESTS OF VERTICAL CYLINDRICAL TANKS AND A VERIFICATION OF NUMERICAL RESEARCHES

Hanna Zubenko, Andrey Drozdov

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

E-mail: zubienko_anna@mail.ru

Received 30 March 2016; accepted 27 May 2016.

Abstract. This article discusses the results of model tests for vertical cylindrical tanks of 20 thousand m³. Since the loads were sufficiently studied for structures with an aspect ratio of height to width ratio of less than 0.5 comprised in the group, so a series of tests was carried out in a wind tunnel models with different forms, consisting in the group roof. The article discusses the results of the verification of numerical studies to test a model with a flat roof. The results on the project took place in the group will be presented in the next article.

Keywords: wind tunnel, aerodynamic coefficient, vertical cylindrical tank.

Анализ публикаций и исследований

Общие научные принципы проектирования, сооружения и эксплуатационной надежности резервуара сформулированы в работах В. Г. Шухова, Г. В. Раевского, В. С. Корниенко, М. М. Сафаряна, Б. В. Поповского, В. П. Березина, Э. М. Ясина, В. Е. Шутова, Ф. Ф. Абузовой, В. Б. Галеева, В. А. Буренина, А. А. Тарасенко, Е. А. Егорова, В. Ф. Муцанова, Ю. В. Федоряки и др. Исследованием данных проблем занимаются коллективы ВНИИмонтажспецстрой, ЦНИИпроектстальконструкция, ВНИПИнефть, УГНТУ, Тюм. ГНУ, ДонНАСА и др. [2–7, 12–14].

К настоящему времени решены вопросы по оценке прочности и устойчивости как отдельных узлов, так и резервуара в целом, разработаны методы расчета остаточного ресурса.

Несмотря на многочисленные работы в области проектирования, строительства и эксплуатации резервуаров, ряд вопросов, связанных с оценкой и повышением работоспособности резервуаров с мембранными покрытиями, остаются открытыми. Среди них следует отметить следующие:

- недостаточно изучены нагрузки и воздействия на ВЦР для новых типов кровель, в т. ч. с провисающими мембранными покрытиями;
- недостаточно изучены нагрузки и воздействия на ВЦР, в т. ч. с провисающими мембранными покрытиями в составе группы.

Для решения задачи по воздействию аэродинамических нагрузок с провисающим типом покрытия для вертикального цилиндрического резервуара выполнен эксперимент в аэродинамической трубе.

Методика исследований и тестовый эксперимент для 1-го резервуара с плоской кровлей

Объект исследования – вертикальный цилиндрический резервуар объемом 20 тыс. м³ с несколькими вариантами кровли (плоской, сферической, провисающей). Габаритные размеры для данного объема ВЦР диаметр 40 м, высота 18 м. Соотношение стрелы подъема для кровли: сферической – $f/D = 1/5,8$, провисающей – $f/D = 1/30$. Модели изготовлены в масштабе М 1:320. Данный масштаб принят для удобства имеющихся стандартных труб из ПХВ для вентиляционных каналов диаметром 125 мм, а также для соблюдения требований соотношения площади проекции экспериментальной модели к площади поперечного сечения рабочей части аэродинамической трубы не должно превышать 5 % [5]. Размеры модели в соответствии с принятым масштабом составляют: диаметр – 128 мм, высота – 56 мм, стрела подъема сферической кровли 22,10 мм, стрела подъема вогнутой кровли 4,16 мм (рис. 1).

Главным условием подобия аэродинамических процессов в натуре и на модели является

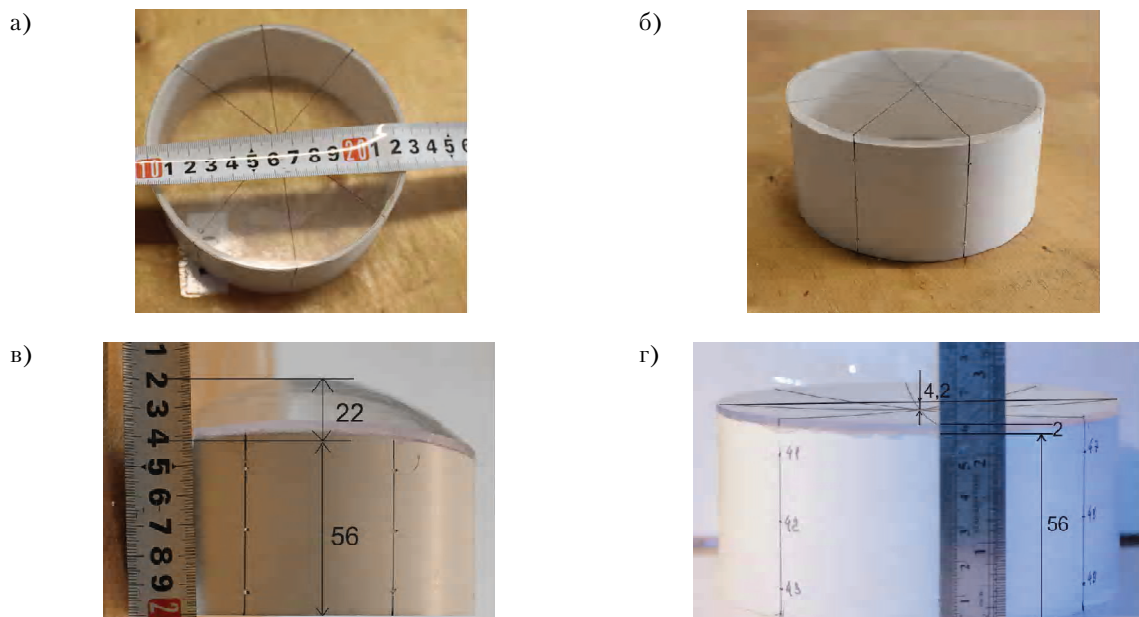


Рисунок 1. Фото моделей исследуемого объекта ВЦР: а), б) вид модели с плоской кровлей; в) вид спереди модели с выпуклой кровлей; г) вид спереди модели с вогнутой кровлей.

геометрическое подобие, для обеспечения которого соответствующие размеры натуральных зданий l_n и моделей l_m должны соответствовать единому масштабу линейных размеров

$$M_i = \frac{l_m}{l_n}. \quad (1)$$

Учитывая реальные натурные размеры застройки (в соответствии с требованиями ВБН расстояние между резервуарами должно составлять $0,5D$, соответственно при компоновке группы 4-х резервуаров объемом 20 тыс. м³ общая длина составляет 100 м) (рис. 2). Выбранные размеры модели позволили создать соответствующие условия турбулизации и торможения приземного пограничного слоя (барьер и элементы шероховатости выполнены в виде кубиков в количестве около 3 000 шт). Вихри большого размера были созданы в потоке двояково-выпуклыми шпильками.

План эксперимента:

1. Изготовление модели.
2. Составление программы испытаний.
3. Установка датчиков в определенных местах.
4. Снятие и аналитическая обработка данных.
5. Тестирование результатов по известным классическим примерам.

По плану экспериментальных исследований модели резервуара М 1:320 в аэродинамической трубе МАТ-1 ДонНАСА предусматривается определение коэффициентов ветрового давления (C_{pi}) в 48 опорных точках на резервуаре (рис. 3). В процессе исследований определяется зависимость $C_{pi} = f(\beta)$ в диапазоне $\beta = 0...360^\circ$ с шагом $\Delta\beta = 10^\circ$. Результаты представлены по 6-ти направлениям ($\beta = 0, 45, 90, 150, 180, 270^\circ$).

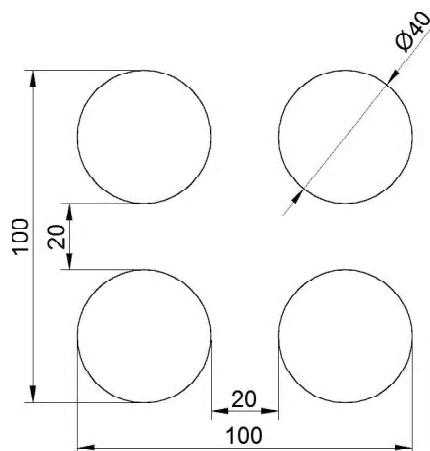


Рисунок 2. Компоновка группы вертикальных цилиндрических резервуаров.

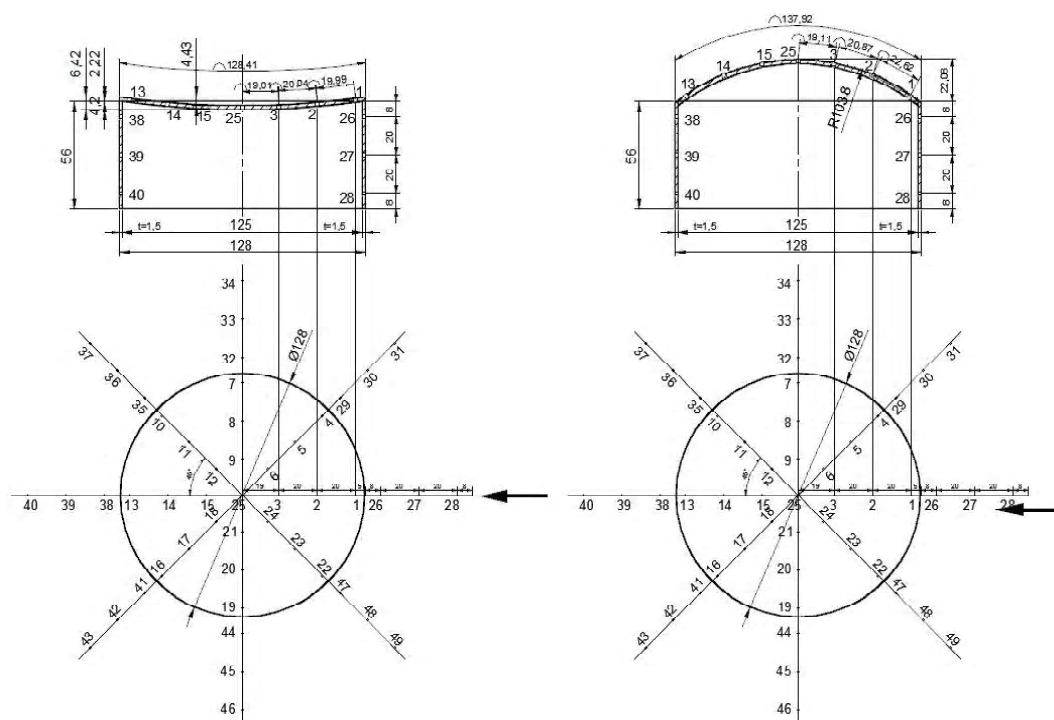


Рисунок 3. Схема модели ВЦР с расстановкой опорных точек.

Тестовый эксперимент для 1-го резервуара

Для модели резервуара с плоской кровлей выполнялся тестовый эксперимент для определения числа Рейнольдса, которое является критерием подобия при проведении аэродинамических экспериментов [5]. На рисунке 4 показаны зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса при трех вариантах моделирования.

При исходных данных характеристик скоростного потока ветра значение числа Рейнольдса определяется как [2]:

$$Re = \frac{L \cdot U(z_e)}{\nu}, \quad (2)$$

где L – диаметр;

ν – кинематическая вязкость воздуха,
 $\nu = 1,49 \dots 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ (определялись во время эксперимента);

$U(z_e)$ – пиковое значение скорости ветра,

$U(z_e) = 14,9 \text{ м/с}$;

$Re \approx 1,28 \cdot 10^5$ – число Рейнольдса.

По результатам, полученным по трем методам, принято решение проводить дальнейший эксперимент при числах Рейнольдса, а именно $Re \approx 1,28 \cdot 10^5$.

Распределение аэродинамических коэффициентов для плоской кровли одного ВЦР показаны на рисунке 5.

На рисунке 6 приведены графики сравнения коэффициентов, полученных экспериментальным и численным путем для модели ВЦР с плоской кровлей, для точек вдоль оси X (расположение точек указаны на рисунке).

Выводы

На основании полученных данных сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформирована расчетная схема для расчета одиночного и группы ВЦР в среде SolidWorks Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических процессов. Основной особенностью этой процедуры стало определение размера области компьютерного моделирования составляющей.

Предложен методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком стенки резервуара (сравнение результатов экспериментальных данных и численного исследования обеспечивают сходимость в пределах 15 % для основных расчетных сечений).

Для группы из 4-х резервуаров на основе численного моделирования получены уточненные значения аэродинамических коэффициентов ветрового давления для каждого из группы резервуаров, обеспечивающие в дальнейшем уточненную оценку НДС конструкции стенки по сравнению с нормируемым в

настоящий момент подходом по ДБН и Еврокод.

Основной расчетной ситуацией для расчета группы ВЦР стало давление на грань (рис. 4а), при этом величины активного давления составили по отношению к нормативным данным на 35 % меньше.

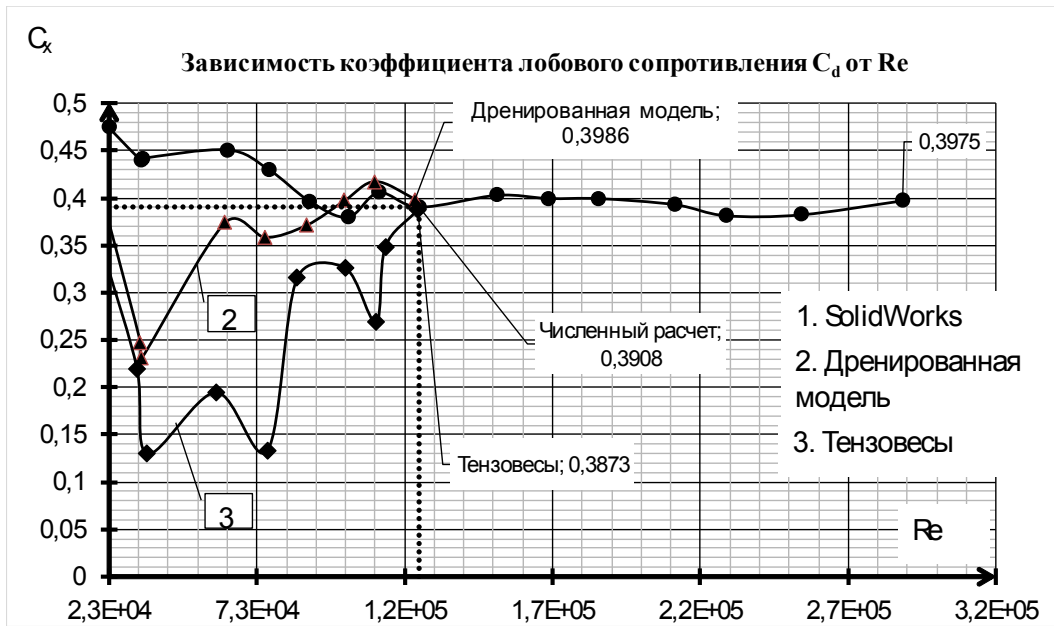


Рисунок 4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления C_d от числа Рейнольдса, где: 1) SolidWorks – график построенный по значениям, полученным при численном моделировании; 2) дренажная модель – график построенный по значениям, полученным при экспериментальном моделировании в аэродинамической трубе для тестовой дренажной модели с плоской кровлей (рис. 1а); 3) тензосесы – график построенный по значениям, полученным при экспериментальном моделировании в аэродинамической трубе для тестовой модели с плоской кровлей, установленной на трехкомпонентные аэродинамические тензометрические весы [6].

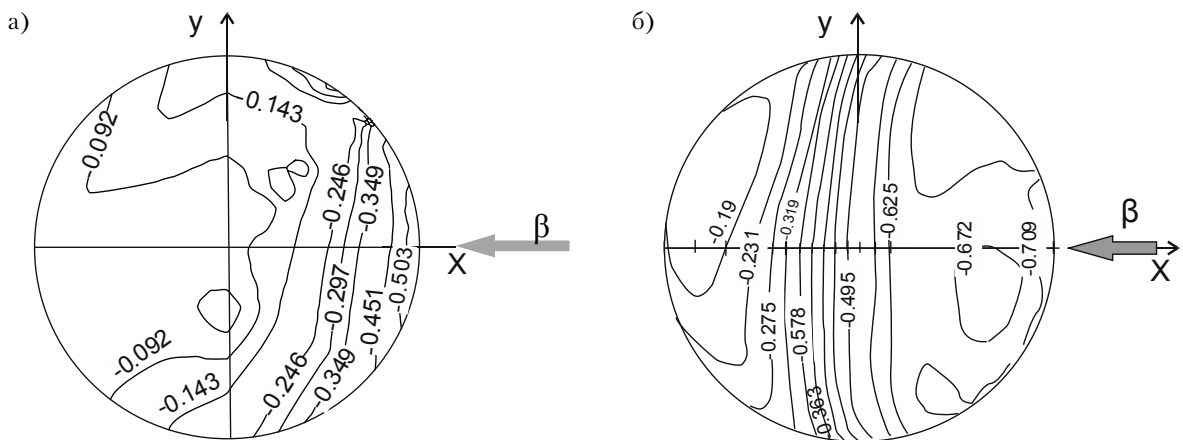


Рисунок 5. Аэродинамические коэффициенты, полученные для модели ВЦР с плоской кровлей в плане: а) картина изополей аэродинамических коэффициентов, полученных экспериментальным путем; б) картина изополей аэродинамических коэффициентов, полученных численным способом в расчетной программе.



Рисунок 6. График сравнения аэродинамических коэффициентов.

Литература

1. User's Guide for ANSYS CFX 12 [Текст]. – Release 12.1. – Canonsburg : ANSYS, Inc., 2009. – 250 p.
2. SolidWorks Flow Simulation 2012 [Электронный ресурс] : Tutorial. – Режим доступа : <https://mahdiy.files.wordpress.com/2011/12/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.pdf>.
3. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра [Текст] / [ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко]. – М. : Стройиздат, 1978. – 216 с.
4. Горлин, С. М. Аэромеханические измерения. Методы и приборы [Текст] / С. М. Горлин, И. И. Слезингер. – Москва : Наука, 1964. – 720 с.
5. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика [Текст] : монография / Э. И. Реттер. – М. : Стройиздат, 1984. – 294 с.
6. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения [Текст] : пер. с англ. / Э. Симиу, Р. Сканлан. – М. : Стройиздат, 1984. – 360 с.
7. Пичугин, С. Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции [Текст] / С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько. – Полтава : АСМІ, 2005. – 342 с.
8. Мембранные конструкции зданий и сооружений [Текст] : Справочное пособие : В 2-х ч. : Ч. 1 / Под ред. В. И. Трофимова и П. Г. Еремеева ; ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1990. – 248 с.
9. ДБН В.1.2-2:2006. Державні будівельні норми. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.0785 ; надано чинності 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с.
10. Eurocode 1: Actions on Structures – General Actions – Part 1–4: Wind Actions [Текст]. – Will supersede ENV 199124:1995 ; introduced January 2004. – Brussels : CEN/TC 250, 2002. – 148 p.
11. Горохов, Е. В. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения [Текст] / Е. В. Горохов, С. Г. Кузнецов. – Донецк : Норд-Пресс, 2009. – 169 с.

References

1. User's Guide for ANSYS CFX 12. Release 12.1. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009. 250 p.
2. SolidWorks Flow Simulation 2012: Tutorial. Accessed at: <https://mahdiy.files.wordpress.com/2011/12/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.pdf>.
3. Handbook on the design of buildings and structures as to wind influence. Moscow: Stroiizdat, 1978. 216 p. (in Russian)
4. Gorlin, S. M.; Slezinger, I. I. Aero-mechanical measuring operation. Methods and tools. Moscow: Science, 1964. 720 p. (in Russian)
5. Retter, E. I. Architectural and structural air mechanics: Monograph. Moscow: Stroiizdat, 1984. 294 p. (in Russian)
6. Simiu, E.; Skanlan, R. Wind influence on buildings and structures. Moscow: Stroiizdat, 1984. 360 p. (in Russian)
7. Pichugin, S. F.; Mahinko, A. V. Wind loading on constructions. Poltava: ASMI, 2005. 342 p. (in Russian)
8. Trofimov, V. I. (Ed.); Eremeev, P. G. (Ed.) Membrane structures of buildings and constructions. Reference book in two parts. The first part. Moscow: Stroiizdat, 1990. 248 p. (in Russian)
9. DBN V.1.22:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
10. Eurocode 1: Actions on Structures – General Actions – Part 1–4: Wind Actions. Will supersede ENV 199124:1995; introduced January 2004. Brussels: CEN/TC 250, 2002. 148 p.
11. Gorokhov, Ye. V.; Kuznetsov, S. G. Experimental methods of determination of wind load on buildings and constructions. Donetsk: Nord-Press, 2009. 169 p. (in Russian)
12. Mushchanov, Volodymyr; Zubenko, Ganna; Moskalenko, Ivan. Numerical simulation of wind pressure

12. Mushchanov, Volodymyr. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface [Текст] / Volodymyr Mushchanov, Ganna Zubenko, Ivan Moskalenko // *Metal Constructions*. 2013. Volume 19, Number 3. P. 173–182.
13. ВБН В 2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [Текст]. – Вводяться вперше; введені в дію з 1 жовтня 1994 року. – Київ: Держкомнафтогаз, 1994. – 95 с.
14. Franke, J. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, quality assurance and improvement of microscale meteorological models [Текст] / J. Franke, F. Hellsten, H. Schlunzen. – Hamburg: COST Action 732, 2007. – 52 p. – ISBN 3-00-018312-4.
15. Murakami, S. Computational wind engineering [Текст] / S. Murakami // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990. Volume 36, Part 1. P. 517–538.
16. Stathopoulos, T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges [Текст] / Theodore Stathopoulos // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997. Volumes 67–68. P. 509–532.
17. Zhang, Aishe. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements [Текст] / Aishe Zhang, Cuilan Gao, Ling Zhang // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2005. Volume 93, Issue 12. P. 891–904.
- on a vertical cylindrical tank surface. In: *Metal Constructions*, 2013, Volume 19, Number 3, pp. 173–182.
13. VBN V 2.2-58.2-94. Vertical steel tanks, holding oil and oil-products, having vapour pressure not above 93,3 kPa. Kyiv: Derzhkomnaftogaz, 1994. 95 p. (in Ukrainian)
14. Franke, J.; Hellsten, F.; Schlunzen, H. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, quality assurance and improvement of microscale meteorological models. Hamburg: COST Action 732, 2007. 52 p. ISBN 3-00-018312-4.
15. Murakami, S. Computational wind engineering. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, Volume 36, Part 1, pp. 517–538.
16. Stathopoulos, T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, Volumes 67–68, pp. 509–532.
17. Zhang, Aishe; Gao, Cuilan; Zhang, Ling. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, Volume 93, Issue 12, pp. 891–904.

Зубенко Ганна Василівна – асистент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: динаміка споруд, розрахунок і проектування просторових конструкцій.

Дроздов Андрій Олександрович – асистент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток методики оцінки вітрового впливу на будівлі, споруди та їх комплекси, удосконалення методик моделювання натурних і модельних випробувань будівель та споруд на вітрове навантаження.

Зубенко Анна Васильевна – асистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: динамика сооружений, расчет и проектирование пространственных конструкций.

Дроздов Андрей Александрович – асистент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие методики оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования натурных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

Zubenko Hanna – assistant; Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the dynamics of structures, calculation and design of spatial structures.

Drozdov Andrey – assistant; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of method estimation of wind effects on buildings, construction and their complexes, perfection of methods modelling of full-scale and modelling tests of wind loads on buildings and structures.