



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2018, ТОМ 24, НОМЕР 4, 143–156
УДК 624.042.41:624.014.7

(18)-0383-1

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ГРУППОВОМ РАСПОЛОЖЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ

А. В. Зубенко

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.
E-mail: a.v.zubenko@donnasa.ru*

Получена 08 ноября 2018; принята 23 ноября 2018.

Анотация. В статье рассматриваются методики формирования ветровой нагрузки за счет уточнения значений аэродинамических коэффициентов для ранее не исследованных конструктивных форм и учета группового расположения. Рассмотрены и проанализированы основные подходы к нормированию ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность. На примере вертикального цилиндрического резервуара объемом 10 тыс. м³ получены значения аэродинамических коэффициентов для выпуклой сферической кровли и стенки резервуара в группе. Разработаны аналитические зависимости для определения ветровых нагрузок на конструктивные элементы (кровля, стенка) резервуара отдельно стоящего и эксплуатируемого в группе.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический резервуар, аэродинамический коэффициент, ветровая нагрузка, компьютерное моделирование.

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ГРУПОВОМУ РОЗТАШУВАННІ РЕЗЕРВУАРІВ

Г. В. Зубенко

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.
E-mail: a.v.zubenko@donnasa.ru*

Отримана 8 листопада 2018; прийнята 23 листопада 2018.

Аннотация. У статті розглядаються методики формування вітрового навантаження за рахунок уточнення значень аеродинамічних коефіцієнтів для конструктивних форм, які раніше не досліджені, і урахування групового розташування. Розглянуто та проаналізовано основні підходи до нормування вітрового навантаження на споруди, що мають кругову циліндричну поверхню. На прикладі вертикального циліндричного резервуара об'ємом 10 тис. м³ отримані значення аеродинамічних коефіцієнтів для сферичної покрівлі та стінки резервуара в групі. Розроблено аналітичні залежності для визначення вітрових навантажень на конструктивні елементи (покрівля, стінка) резервуара, що стоїть окремо і експлуатується в групі.

Ключові слова: вертикальний циліндричний резервуар, аеродинамічний коефіцієнт, вітрове навантаження, комп'ютерне моделювання.

THE METHOD OF WIND LOAD FORMATION IN THE GROUP ARRANGEMENT OF TANKS

Hanna Zubenko

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

E-mail: a.v.zubenko@donnasa.ru

Received 8 November 2018; accepted 23 November 2018.

Abstract. The article discusses the methods of wind load formation, by clarifying the values of aerodynamic coefficients for previously unexplored structural forms and taking into account the group location. The main approaches to the rationing of the wind load on structures with a circular cylindrical surface were considered and analyzed. Using the example of a vertical cylindrical tank with a volume of 10 thousand m³, the values of aerodynamic coefficients are obtained for a convex spherical roof and a tank wall in a group. Analytical dependencies have been developed for determining wind loads on structural elements (roof, wall) of separate and operated tanks in a group.

Keywords: vertical cylindrical tank, aerodynamic coefficient, wind load, computer simulation.

Введение

Для нормирования ветровой нагрузки на здания и сооружения применяются следующие методы исследования:

1. Аналитические методы. Однако данные методы охватывают ограниченный круг задач.
2. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе. Являются надежным средством изучения процесса обтекания воздушным потоком зданий, сооружений и их комплексов. Применяются в основном для новых и сложных сооружений.
3. Компьютерное моделирование воздействия воздушного потока. Позволяет определять основные расчетные аэродинамические характеристики для зданий и сооружений. Является одним из развивающихся способов. Требуется проводить ряд тестовых задач, которые проводились в аэродинамических лабораториях, для верификации выбранной модели.

Анализ нормативных документов и результатов научных исследований

В книгах Е. В. Горохова [1] и П. Г. Еремеева [2] представлены результаты модельных экспериментальных исследований ветровых и снеговых нагрузок на технически сложные большепролетные покрытия со сложной геометрией.

Основные методики расчета ветровой нагрузки на здания и сооружения с использованием аэродинамических формул, были разработаны в начале 70-х годов в ЦНИИСК им. Кучеренко на основе работ А. Давенпорта и А. Вайза и реализованы в СНиП II-6-74 [3]. В 1985 г. при выпуске СНиП 2.01.07-85 [4] были упрощены выражения, описывающие динамическую реакцию сооружений при действии ветра [5].

Основные теоретические сведения об архитектурно-строительной аэродинамике, методиках определения ветровой нагрузки на здания и сооружения представлены в работах Э. Симиу, Р. Сканлан, Э. И. Реттер [6, 7]. Работы Е. В. Горохова, М. А. Березина [8, 9] посвящены определению ветровых воздействий на здания и сооружения в аэродинамической трубе. В работах Р. И. Кинаша, J. D. Holmes, С. А. Исаева [10–12] описаны экспериментальные моделирования взаимодействия ветрового потока с инженерными сооружениями в аэродинамической трубе.

Численному моделированию ветровых воздействий посвящены исследования С. А. Исаева, В. Ф. Муцанова, Y. Tominaga [13–15] и др.

Методика расчета ветровой нагрузки для отдельно стоящего резервуара по нормам

Действие ветровой нагрузки формирует распределение избыточного давления на поверхности сооружения. В современных инженерных

методиках расчета, применяемых в нормативных документах [4, 16, 17] для определения ветровой нагрузки на поверхность вертикального цилиндрического резервуара, используют формулы (табл.1).

В отечественных нормах значение скорости v_0 определяется с 10-минутным интервалом осреднения и превышаемой в среднем один раз в 50 лет, в зарубежных с 3-секундным интервалом осреднения.

Геометрические особенности сооружений учитывают аэродинамическим коэффициентом, который определяют, используя графики зависимости значений аэродинамических коэффициентов от положения угла β , отсчитываемый от оси направления ветрового потока (рис. 1). Для более практического определения ветровой нагрузки (рис. 1) коэффициент C_β можно представить в виде пятичленного ряда, который используется в [20–22]:

$$C_\beta(a, \beta) = \sum_{i=0}^5 a_i \cos\left(\frac{\pi\beta \cdot i}{180}\right). \quad (1)$$

Значения коэффициентов зависят от числа Рейнольдса. Для отечественных норм коэффи-

циенты по высоте резервуара определяются при $Re > 4.105$, а для европейских норм коэффициенты определяются по трем значениям числа Рейнольдса, а именно $Re = 2,106$, $Re = 107$, $Re = 5,105$ [17, 19].

Для кровли значения коэффициентов определяются в зависимости от соотношения высоты к диаметру, и в нормах не указывается зависимость от числа Рейнольдса. По украинским нормам аэродинамический коэффициент определяется только для сферического типа кровли резервуара и является постоянным, и зависит от соотношения стрелы подъема кровли f к диаметру резервуара D [16], по нормам Eurocode и СП определяются значения в трех точках А, В, С в зависимости от геометрических параметров резервуара (рис. 2).

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

- нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары для новых типов кровель недостаточно изучены;

Таблица 1. Расчетные формулы для скорости, динамического давления и расчетного давления по различным нормативным документам [16–19]

Нормативный документ	Скорость	Динамическое давление	Давление на сооружение (сила)
ДБН В.1.2-2:2006 (Украина)	$V = v_0 \beta \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha}$	$w_0 = \frac{1}{2} \rho V^2$	$w_m = \gamma_{fm} w_0 C$
СП 20.13330.2011 (Российская Федерация)	$v_{50} = v_0 \beta \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha}$	$w_0 = 0.43 v_{50}^2$	$w = w_0 k(z_e) c(1 + (ze))$
ISO4354 (Международный стандарт)	$V = v_0 \beta \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha}$	$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho V^2$	$w = (q_{ref}) (C_{exp}) (C_{fig}) (C_{dyn})$
ENV 1191-2-4 (стран объединенной Европы)	$v_{ref} = c_{dir} c_{season} v_{ref,0}$ $v_{ref,0} = k_r \ln(z/z_0)$	$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$	$w_e = q_{ref} c_e(z) c_{pe}$
ASCE 7-05 (США)	$V = v_0 \beta \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha}$	$q_z = \frac{1}{2} \rho K_z K_{zt} K_d V^2 I$	$p = q(GC_p)$
АИ (Япония)	$U_H = U_0 K_D E_H k_{rw}$	$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2$	$W_f = q_H C_f G_f A$

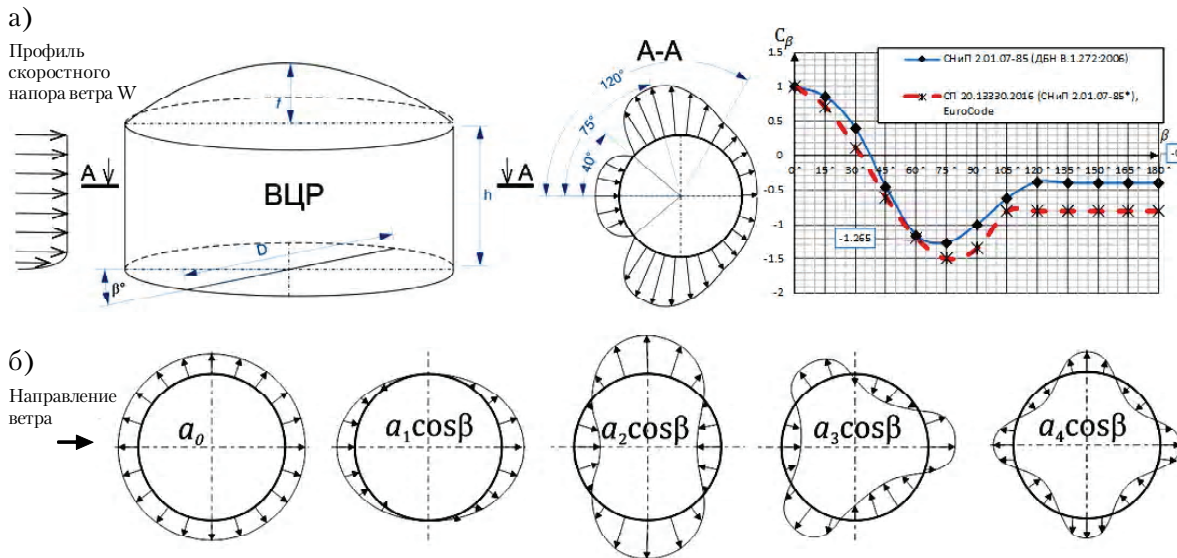


Рисунок 1. Эпюры аэродинамических коэффициентов C_β : а) схема для определения C_β по нормативным документам; б) эпюры аэродинамического коэффициента при разложении рядами Фурье зависимости C_β (формула 1).

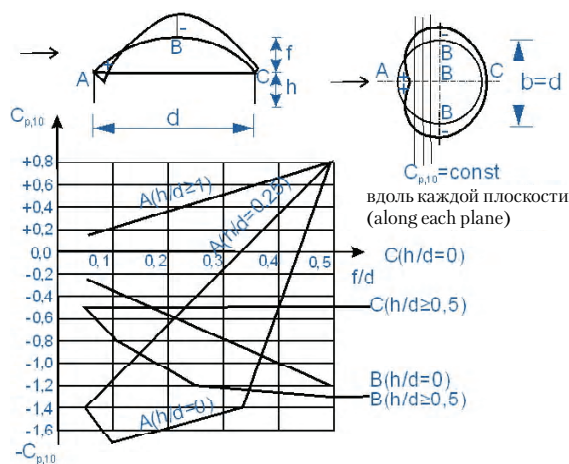


Рисунок 2. Схема к определению коэффициентов для сферической кровли.

- практически недостаточно изучены нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары в составе группы [23–24], несмотря на то, что для большинства нефтехранилищ такая компоновка резервуаров является преимущественной.

Поэтому поставлены следующие задачи:

- выполнить исследование ветровой нагрузки для изолированного одиночного ВЦР со сферической кровлей для соотношений стрелы подъема (f) к диаметру сооружения (D): $f/D = 0,09$ и $f/D = 0,11$ и $0,17$;

- получить значения аэродинамических коэффициентов для стенки и кровли отдельного стоящего вертикального цилиндрического резервуара, представленного в виде кругового цилиндра с заданными исходными геометрическими и термодинамическими параметрами в масштабе 1:1, и сравнить с полученными нормативными значениями;
- получить аналитические зависимости для стенки резервуара, находящегося в группе из четырёх резервуаров;
- получить аналитические зависимости для сферической кровли резервуара, находящегося в группе из четырёх резервуаров.

Для решения сформированных выше задач выполнен расчет для моделей ВЦР в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulations, некоторые результаты которого приведены в публикациях [25, 26].

Численный эксперимент. Размер домена расчетной области

Основными необходимыми параметрами для выполнения численного расчета в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation являются значения скорости $v(z)$, интенсивности турбулентности $I_v(z)$ и продольного интегрального масштаба турбулентности $L_u(z)$.

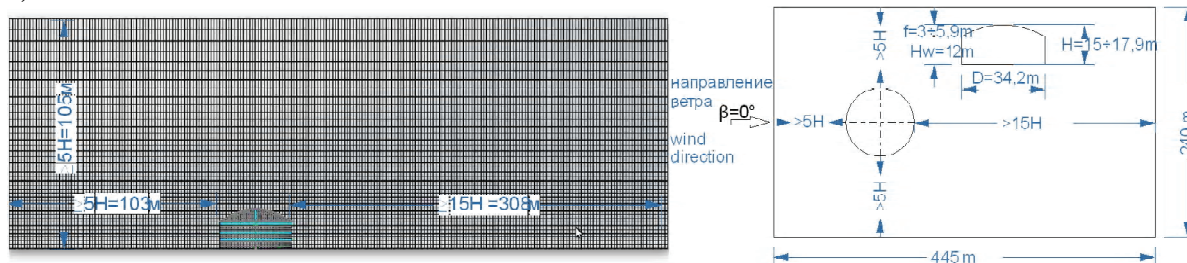
Из опыта исследований в аэродинамических трубах полагают, что сооружение высотой H влияет на расстояние распределения ветрового потока почти до $10H$. И как показали тестовые расчеты Японского Института Архитектуры [28–29], размер расчетной области по вертикали для изолированных сооружений должен составлять минимум $5H$. При исследовании группы объектов рекомендуется использовать коэффициент загромождения, который равен отношению площади поперечного сечения сооружения к площади поперечного сечения расчетной области, коэффициент не должен превышать 3 %. В нашем случае для объектов группы при максимальном значении высоты сооружения $H \approx 18$ м процент загромождения составит 1,8 ~ 2,3 %. Ширину расчетной области также необходимо назначать, чтобы коэффициент загромождения был менее 3 %. Расстояние вдоль потока до сооружения должно составлять минимум $5H$. И расстояние за сооружением должно составлять $15H$ и более. Ниже на рисунке 3а показаны схемы домена для отдельно стоящего резервуара.

В программе SOLIDWORKS Flow Simulation предусмотрен автоматический анализ геометрии исследуемого объекта и формируется расчетная область – домен в виде параллелепипеда. Программа позволяет формировать сетку автоматически или вручную пользователем. Область занятая твердым телом исключается из расчета. Для получения более точных результатов область вблизи объекта исследования измельчается путем ввода локальной сетки.

Трехмерная параметрическая модель вертикального цилиндрического резервуара создавалась в CAD – программе SOLIDWORKS.

В среде SOLIDWORKS Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических процессов были созданы расчетные схемы для отдельно стоящего вертикального цилиндрического резервуара и группы из четырех резервуаров в масштабе 1:1, выполнялся эксперимент в аэродинамической трубе МАТ – 1 ДонНАСА в масштабе 1:320 [26, 30]. На рисунке 3 показаны размер расчетной области для отдельно стоящего резервуара, и резервуара, состоящего в группе из четырех объектов.

а)



б)

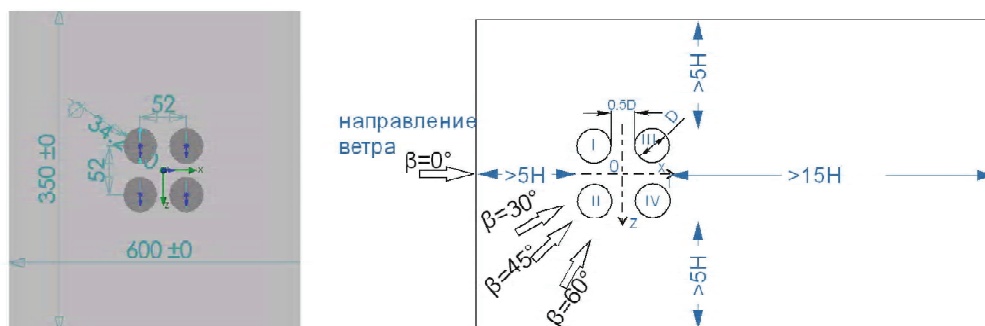


Рисунок 3. Размер расчетной области: а) для отдельно стоящего резервуара, б) для группы.

Выбор граничных и начальных условий

Профиль средней скорости на входе, как правило, получают в соответствии с требованиями нормативных документов. Для нашего исследования были приняты профиль средней скорости $v_m(z)$, интенсивность турбулентности $I_v(z)$, интегральный масштаб турбулентности $L_u(z)$ по формулам методик норм Eurocode и РФ. Т. к. энергия пульсаций скорости в методике норм РФ описывается спектром Давенпорта, который не учитывает зависимость энергии турбулентных пульсаций ветра от высоты, и интегральный продольный масштаб турбулентности принимает постоянное значение $L_u(z) = 1\ 200$ м, интенсивность турбулентности в явном виде не фигурирует, ее можно получить по рекомендациям «Руководства к расчёту зданий и сооружений на действие ветра» [31, с. 74]. Нормативное значение скорости для исследуемого сооружения было принято из условия строительства объекта в первом ветровом районе и составило 30 м/с.

Расчетное значение скорости по методике Eurocode определялось формуле (2), а интегральный продольный масштаб турбулентности по формуле (3).

$$v_m(z) = [1 + 7I_v(z)]^{0.5} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) v_{b0}. \quad (2)$$

Интегральный продольный масштаб турбулентности:

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha, \quad (3)$$

где $z_t = 200$ м – базовая высота;

$L_t = 300$ м – базовый масштаб;

$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$;

z_0 – длина неровности, $z_0 = 0,003$ для открытых поверхностей.

Расчетное значение скорости по методике норм Российской Федерации [17] определялось по формуле (4):

$$v = v_0 k(z_e) [1 + \zeta(z_e)]^{0.5}, \quad (4)$$

где $k(z_e) = k_{10} (z_0/10)^2$ – изменение ветрового давления для высоты (z_e) $k_{10} = 1$;

$\alpha = 0,15$ для типа местности А;

$\zeta(z_e) = \zeta_{10} (z/\alpha)^{-\alpha}$ – коэффициент пульсаций $\zeta_{10} = 0,76$ для типа местности А.

Интенсивность турбулентности:

$$I(z_e) = 2.45 k_0^{0.5} \zeta_{10} (z/\alpha)^{-\alpha}, \quad (5)$$

где $k_0 = 0,005$ – коэффициент шероховатости, подстилающей поверхности для открытой местности.

При назначении размера сетки конечного объема для решения CFD (Computer Fluid Dynamics) задачи руководствовались рекомендациями А. Moshida, Y. Tominaga [27] из Японского Института Архитектуры. А именно решение сетки должно составлять 1/10 от наиболее низкого сооружения в группе (около 0,5...5м) в области целевого сооружения.

Соотношение сеток для последовательных систем сеток не должно превышать 3...4 м [21].

Также необходимо задать одну или несколько целевых функций для своевременного завершения расчета последовательных приближений и сокращения времени счета критерии сходимости. В качестве критериев сходимости могут быть выбраны целевые функции давления, плотности, скоростей и др. В нашем случае расчета в качестве целевых функций были приняты следующие критерии: полное давление, средняя плотность, средняя скорость и сила давления [32].

Анализ результатов численного эксперимента

В рамках решения задачи получены поля распределения скоростей и относительного давления (рис. 4, 5), также величины аэродинамических коэффициентов для отдельно стоящего резервуара объемом 10 тыс. м³ с различным соотношением для кровли, которые приведены на рисунке 5. Габаритные размеры резервуара составляют: высота $H = 12$ м, диаметр $D = 34,2$ м, стрела подъема кровли сферического покрытия $f = 3; 3,8$ и $5,9$ м соответственно. Значения стрелы подъема были выбраны в соответствии с рекомендациями к проектированию [33]. Значения определены на отметке 6 м и сопоставлены с нормативными значениями.

По характеру следа распределения скоростей на рис. 4 видно, что чем выше соотношение f/D , тем выше характер турбулентности позади рассматриваемого вертикального цилиндрического резервуара.

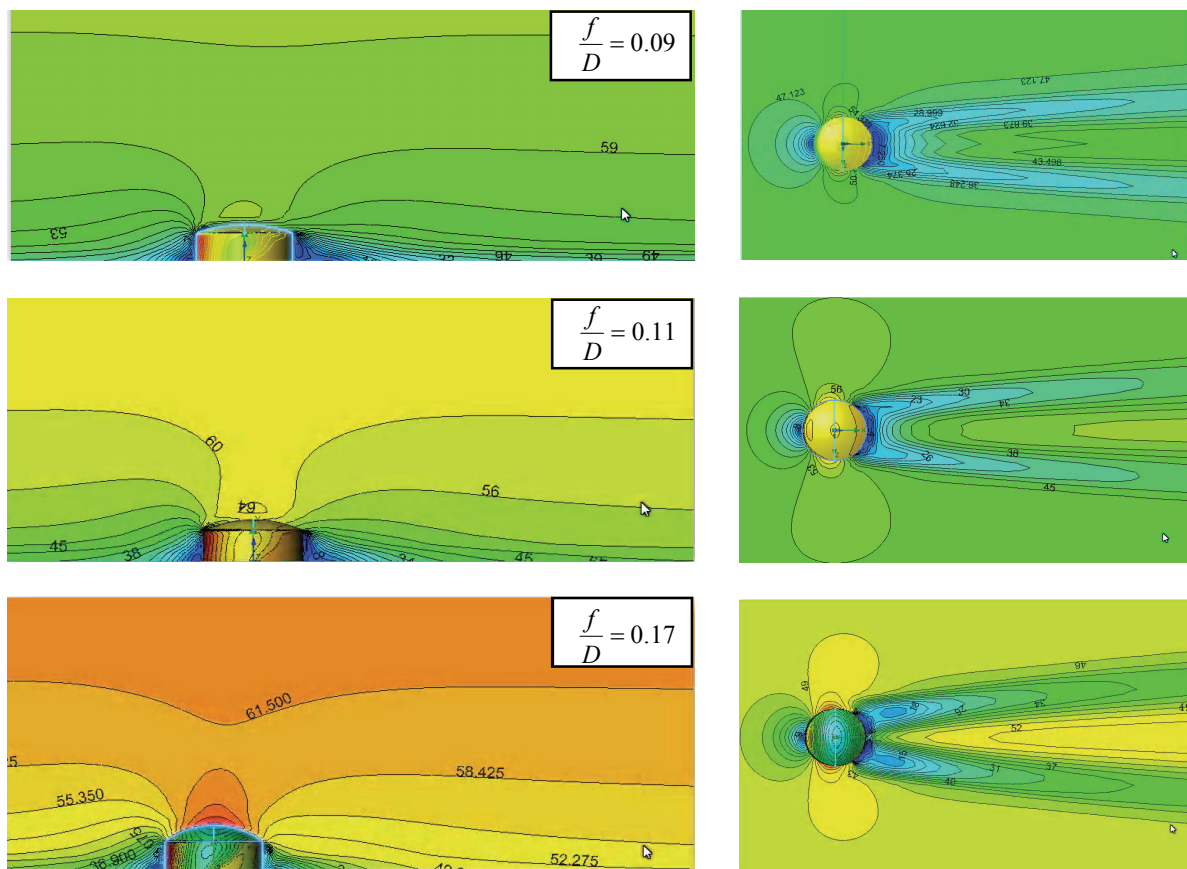


Рисунок 4. Поля распределения скоростей.

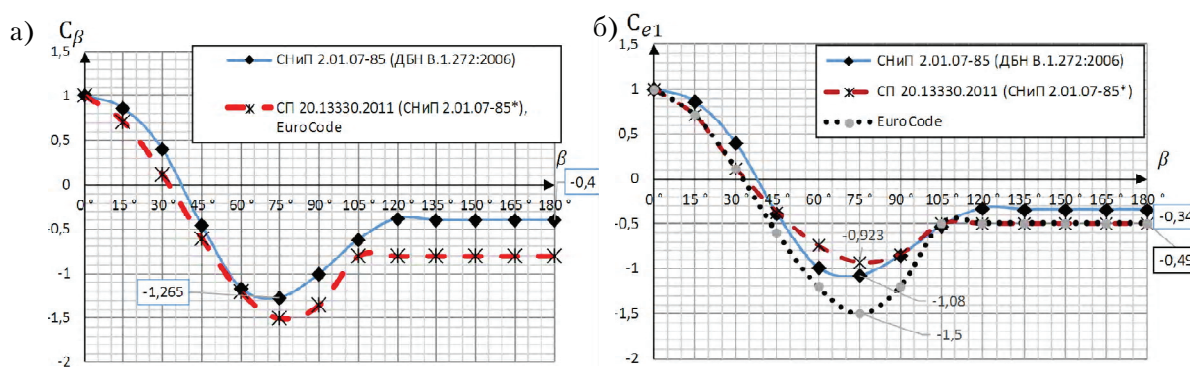


Рисунок 5. Нормативные значения аэродинамических коэффициентов для объектов с круговой поверхностью.

Полученные при компьютерном моделировании в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation аэродинамические коэффициенты сравним с нормативными значениями, полученными по методикам национальных норм Украины (ДБН В.1.272:2006), Российской Федерации (СП 20.1330.2016) и Eurocode.

На рисунке 5 показано распределение аэродинамических коэффициентов вокруг цилиндрического сооружения:

- C_β без учета размеров объекта;
- $C_{e1} = C_\beta \cdot k$ объекта с соотношением $H/D = 0,35$, в котором учитываются так называемые краевые условия с коэффициентом k [32, с. 52; 22, с. 71; 26, с. 66].

Как мы видим на рисунке 5а рекомендуемые значения аэродинамических коэффициентов по методике СП и Eurocode идентичны и расходятся со значениями коэффициентов по методике ДБН в зоне вакуумметрического давления на 50 %, что связано с тем, что по методике ДБН число Рейнольдса ограничивается значением $Re > 4 \cdot 10^5$, а в методиках СП и Eurocode более дифференцированный подход и значения числа Рейнольдса представлены тремя значениями. Само значение числа Рейнольдса зависит от размеров объекта, а именно диаметра и скорости и определяется по формуле (6).

$$Re = \frac{D \cdot v(z_e)}{\nu}, \quad (6)$$

где D – диаметр;

ν – кинематическая вязкость воздуха,

$\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;

$v(z_e)$ – значение скорости ветра, $v(z_e) = 30 \text{ м/с}$.

На рисунке 5б показаны аэродинамические коэффициенты с учетом коэффициента краевых условий, и мы видим, что значения по методике ДБН и СП близки к друг другу и различие сводится к 15 % при $\beta = 75^\circ$, и 30 % при $\beta = 105^\circ$ до 180° , также заметно расхождение между СП и Eurocode при $\beta = 75^\circ$, это связано с различиями при определении коэффициента краевых условий k . По методике СП коэффициент краевых условий $k = 1$ при $C_\beta > 0$, $k = k_\lambda$

[17, 34, с. 58] при C_β , а по методике Eurocode определяется по трем условиям по формуле 7.

$$1) \quad \psi_{\lambda 0} = 1,$$

при $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\min}$ ($\alpha_{\min} = 75^\circ$, при $Re = 10^7$),

$$2) \quad \psi_{\lambda 0} = \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cdot \cos\left(\frac{x}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_a - \alpha_{\min}}\right)\right), \quad (7)$$

при $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_a$ ($\alpha_a = 105^\circ$, при $Re = 10^7$),

$$3) \quad \psi_{\lambda 0} = \psi_\lambda,$$

при $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 180^\circ$.

На рисунке 6 показаны для сравнения распределения полученных аэродинамических коэффициентов для исследуемого резервуара.

Коэффициент корреляции для значений численного эксперимента составляет 0,92 для объектов, посчитанных по методике СП, и 0,97 – по методике Eurocode. В целом можно сделать вывод, что исходные начальные параметры скорости $v_m(z)$, интенсивности турбулентности $L(z)$ и продольного масштаба турбулентности $L(z)$, а также размеры расчетной области и размеры сетки являются корректными.

По полученным значениям численного эксперимента была выведена зависимость для определения коэффициентов для одиночного резервуара с учетом геометрических параметров высоты H , диаметра D , стрелы подъема кровли по отношению к изменению высоты:

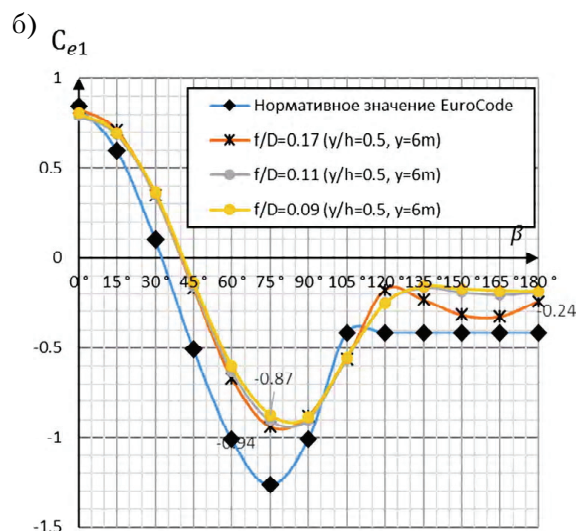
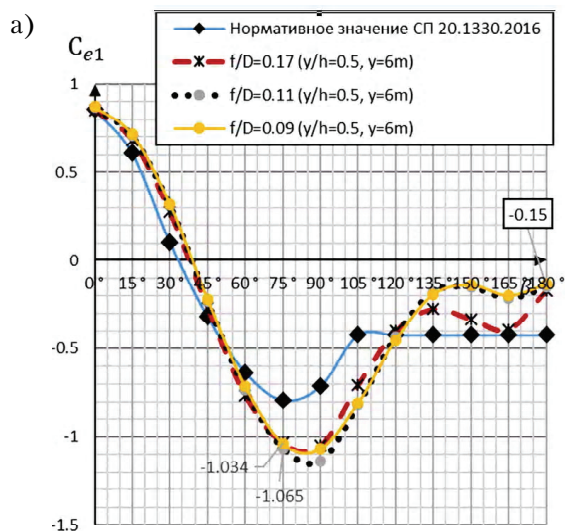


Рисунок 6. Аэродинамические коэффициенты, полученные при компьютерном моделировании для рассматриваемого вертикального цилиндрического резервуара: а) по методике СП; б) по методике Eurocode.

$$C_{\beta}\left(a, \beta, y/H, \frac{H}{D}, \frac{f}{D}\right) = \sum_{i=0}^4 a_i \cos\left(\frac{\pi \beta i}{180}\right) \cdot \left(\sum_{i=5}^9 a_i \cdot (y/H)^{i-5}\right) + (a_{10} \cdot H/D + a_{11} \cdot f/D). \quad (8)$$

На рисунке 7 показаны графики сравнения аэродинамических коэффициентов, полученных по формуле 8, с нормативными значениями.

Как уже отмечалось выше, в методиках по СП и Eurocode используются различные подходы при определении основного параметра ветрового давления, а именно скорости, соответственно полученные результаты также имеют различия, но в целом коррелируются.

Используя аналогичный подход была выведена зависимость (формула 9) для определения коэффициентов для резервуара, состоящего в группе:

$$C_{\beta}\left(a, \beta, y/H, \frac{H}{D}, \frac{f}{D}\right) = \left[\sum_{i=0}^4 a_i \cos\left(\frac{\pi \beta i}{180}\right) + \sum_{i=5}^8 a_i \sin\left(\frac{\pi \beta (i-4)}{180}\right) \right] \times (9) \times \left(\sum_{i=9}^{14} a_i (y/H)^{i-9} \right) + (a_{15} H/D + a_{16} f/D).$$

Таблица 2. Значения параметра a в рядах Фурье (формула 8)

a_i	f/D					
	EN 1991-1-4:2005			СП 20.1330.2016		
	0.09	0.11	0.17	0.09	0.11	0.17
0	-0.163	-0.157	-0.147	-0.556	-0.704	-0.734
1	0.33	0.335	0.42	0.289	0.279	0.345
2	0.706	0.696	0.736	0.747	0.72	0.675
3	0.32	0.336	0.398	0.28	0.286	0.323
4	-0.065	-0.069	-0.063	-0.057	-0.071	-0.038
5	0.784	0.797	0.707	1.176	1.124	1.073
6	0.14	0.136	0.146	-0.172	-0.1	-0.088
7	-0.174	-0.183	-0.127	-0.704	-0.532	-0.484
8	0.07	0.072	0.084	0.108	0.107	0.111
9	-0.204	-0.189	-0.148	0.308	0.159	0.154
10	-0.234	-0.221	-0.196	0.438	0.706	0.519
11	0.024	-0.086	-0.382	0.684	1.063	1.021

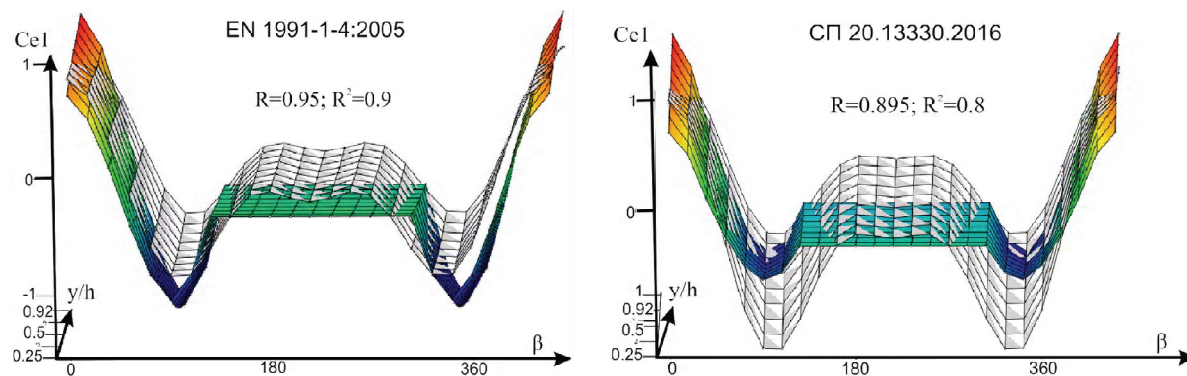


Рисунок 7. График сравнения аэродинамических коэффициентов: цветом показаны нормативные значения; белым цветом показаны значения, полученные по эмпирической формуле для одиночного резервуара ($H/D=0.35$).

На рисунке 8 показаны графики сравнения аэродинамических коэффициентов, полученных по формуле 9, с нормативными значениями по Eurocode.

В работе [34] представлены результаты сравнения напряженно-деформированного состояния вертикального цилиндрического резервуара. По результатам численного моделирования в программном комплексе SCAD Office наибольшее отклонение зафиксировано в верхних поясах стенки ВЦР, напряжения получились большими от действия ветровой нагрузки, полученной при численном моделировании в

SOLIDWORKS Flow. Значительное отличие в верхних поясах можно объяснить «срывом» ветрового потока в зоне стыка кровли со стеной, таким образом, некоторая часть верхнего пояса находится под действием «отрывающей ветровой нагрузки».

На рисунке 9 показаны различия аэродинамических коэффициентов для резервуара, отдельно стоящего, с резервуаром, который находится в группе.

Как видно (рис. 9), увеличивается вакуумметрическое ветровое давление до 30 % за счет влияния близлежащего резервуара.

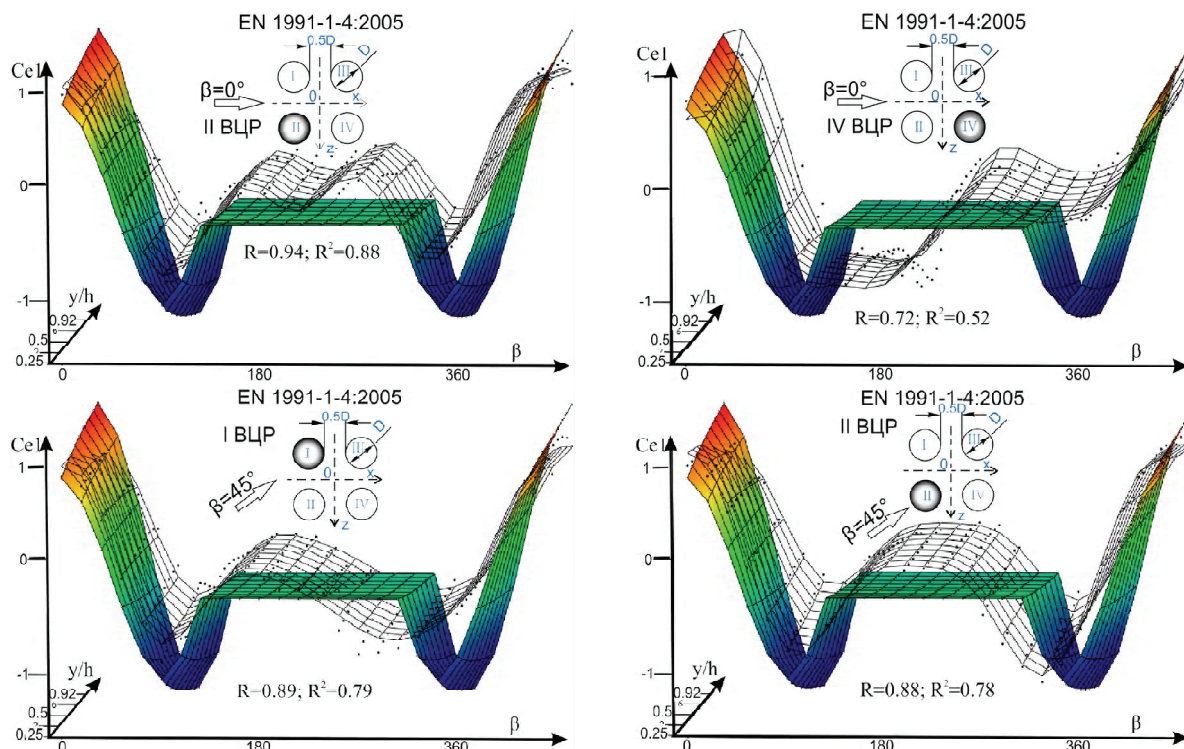


Рисунок 8. График аэродинамических коэффициентов для резервуара, состоящего в группе.

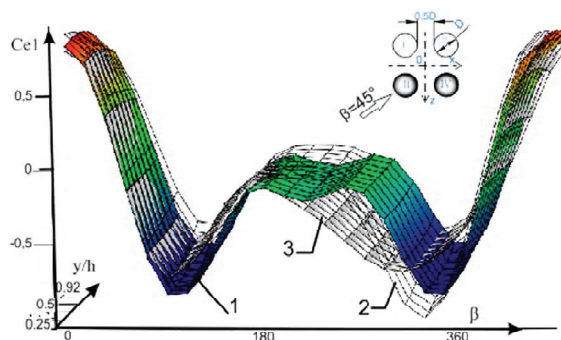


Рисунок 9. График аэродинамических коэффициентов для отдельно стоящего и резервуара, состоящего в группе: где 1 – значения для резервуара, отдельно стоящего; 2 – значения для II резервуара в группе; 3 – значения для IV резервуара в группе.

Выводы

1. На основании полученных данных сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформирована расчетная схема для расчета одиночного вертикального резервуара объемом 10 тыс. м³ со сферической выпуклой кровлей в среде SOLIDWORKS Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических процессов. Основной особенностью этой процедуры стала составляющая определения размера области компьютерного моделирования и размеров ячеек расчетного домена, заключающаяся в определении граничных и начальных условий задачи.
2. Предложен методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком стенки резервуара, основные этапы которого заключаются в определении:
 - размеров расчетной области;
 - величины ячеек сетки расчетного домена;
 - расчетного значения скорости по методике национальных норм;
 - значения интенсивности турбулентности;
 - значения продольного интегрального масштаба турбулентности;
 - критериев сходимости расчетного процесса.
3. Предложен методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком кровли и стенки отдельно стоящего резервуара с выпуклой кровлей (сравнение результатов нормативных данных и численного исследования обеспечивают сходимость в пределах 10 % для основных расчетных сечений, и коэффициент корреляции составляет 0,97).
4. Предложены аналитические зависимости для определения ветровой нагрузки для резервуара, состоящего в группе. Различия значений для отдельно стоящего и резервуара в группе составляет в зоне максимального отрицательного давления до 30 %.

Литература

1. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов / Е. В. Горохов, В. Ф. Мущанов, Р. И. Кинаш, А. В. Шимановский, И. Н. Лебедич. – Макеевка : РИО ДонНАСА, 2008. – 405 с.
2. Еремеев, П. Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: монография / П. Г. Еремеев. – М. : АСВ, 2009. – 336 с.
3. СНиП II-6-74*. Нагрузки и воздействия. – Взамен СНиП II-A.11-62; СН 318-65; СН 355-66; введ. 1974-09-01. – М. : Стройиздат, 1976. – 58 с.
4. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – Взамен главы СНиП II-6-74; введ. 1987-01-01. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с. – (Строительные нормы и правила).
5. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – М. : Стройиздат : изд-во лит. по стр-ву, 1972. – 111 с.
6. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения : пер. с англ. / Э. Симиу, Р. Сканлан. – М. : Стройиздат, 1984. – 359 с.
7. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : монография / Э. И. Реттер. – М. : Стройиздат, 1984. – 294 с.
8. Горохов, Е. В. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения / Е. В. Горохов, С. Г. Кузнецов. – Донецк : Норд-Пресс, 2009. – 169 с.

References

1. Designs of stationary coatings over the stands of stadiums / E. V. Gorokhov, V. F. Mushchanov, R. I. Kinash, A. V. Shimanovsky, I. N. Lebedich. – Makeyevka : RIO DonNASA, 2008. – 405 p. (in Russian)
2. Eremeev, P. G. Modern steel structures of large-span coatings of unique buildings and structures : monograph / P. G. Eremeev. – M. : DIA, 2009. – 336 p. (in Russian)
3. SNiP II-6-74*. Load and impact. – Instead of SNiP II-A.11-62; CH 318-65; CH 355-66; lead 1974-09-01. – M. : Stroyizdat, 1976. – 58 p. (in Russian)
4. SNiP 2.01.07-85*. Load and impact. – Instead of the head of SNiP II-6-74; enter 1987-01-01. – M. : FSUE ZPP, 2005. – 44 p. – (Building regulations). (in Russian)
5. Savitsky, G. A., Wind load on structures / G. A. Savitsky. – M. : Stroyizdat: Publishing of lit. on construction, 1972. – 111 c. (in Russian)
6. Simiu, E. The impact of wind on buildings and structures: Translated from English / E. Simiu, R. Scanlan. – M. : Stroiizdat, 1984. – 359 p. (in Russian)
7. Retter, E. I. Architectural and construction aerodynamics: monograph / E. I. Retter. – M. : Stroiizdat, 1984. – 294 p. (in Russian)
8. Gorokhov, E. V. Experimental methods for determining wind loads on buildings and structures / E. V. Gorokhov, S. G. Kuznetsov. – Donetsk : Nord-Press, 2009. – 169 p. (in Russian)

9. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М. А. Березин, В. В. Катюшин. – Новосибирск : изд-во ООО Олденполиграфия, 2003. – 140 с.
10. Кинаш, Р. И. Исследование аэродинамических параметров системы из двух круговых цилиндров / Р. И. Кинаш, А. Е. Копылов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури, 2007. – Вип. 2007–6(68) Баштові споруди. – С. 32–40.
11. Кинаш, Р. И. Аэродинамические исследования четырех круглых цилиндров // Р. И. Кинаш, А. Е. Копылов // Вісник НУ Львівська політехніка, 2004. – Номер 2004. – № 495 Теорія і практика будівництва. – С. 88–92.
12. Suppression of the Karman vortex street and reduction in the frontal drag of a circular cylinder with two vortex cells / S. A. Isaev, P. A. Baranov, N. I. Vatin, Y. V. Zhukova, A. G. Sudakov // Technical Physics Letters, 2014. 40 (8). P. 653–656.
13. Problems and methods of numerical and experimental investigation of high rise constructions' aerodynamics in the coastal region «sea–land» / S. A. Isaev, N. I. Vatin, V. A. Lebiga, V. N. Zinoviev, K. – C. Chang, J. – J. Miao // Magazine of Civil Engineering, 2013. 37(2). P. 54–61.
14. Mushchanov, V. P. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface / V. P. Mushchanov, G. V. Zubenko, I. V. Moskalenko // Металлические конструкции. 2013. № 3. С. 235–243.
15. Tominaga, Y. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings / Y. Tominaga, et al. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. 96(10). P. 1749–1761.
16. ДБНВ.1.272:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – Взамен СНиП 2.01.07–85, кроме раздела 10; введ. 2007-01-17. – К. : Минстрой Украины, 2006. – 78 с.
17. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия; СП 20.13330.2016. – Изд. офиц. – М. : Госстандарт, 2016. – 80 с. – (Свод правил).
18. Holmes, J. D. Wind Loading of Structures / J. D. Holmes. – Taylor & Francis e–Library, 2004. – 366 p. – Режим доступа : <https://doi.org/10.4324/9780203301647>.
19. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–4. Загальні дії. Вітрові навантаження : ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). – Офіц. вид. – К. : Міністерство України, 2012. – (Національний стандарт України).
20. Солодарь, М. Б. Металлические конструкции вытяжных башен // М. Б. Солодарь, М. В. Кузнецова, Ю. С. Плишкин. – Л. : Строй издат, 1975. – 186 с.
21. Godoy, Luis A., Portela, Genok, A review of wind-tunnel results of pressures on tank models / A. Luis Godoy, Genok, Portela. 2002. – 19 p. – Режим доступа : <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/elearning/tanques/documentos/pub/oureachreviewwind.pdf>.
9. Berezin, M. A. Atlas of aerodynamic characteristics of building structures / M. A. Berezin, V. V. Katyushin. – Novosibirsk: publishing house LLC Oldenpoligrafiya, 2003. – 140 p. (in Russian)
10. Kinash, R. I., Kopylov, A. E. Study of the aerodynamic parameters of a system of two circular cylinders / R. I. Kinash, A. Ye. Kopylov // In: *Proceedings of Donbas State National Academy of Civil Engineering and Architecture Affairs*, 2007. – Issue. 2007–6(68) Tower structures. – P. 32–40. (in Ukrainian)
11. Kinash, R. I., Kopylov, A. Ye. Aerodynamic studies of four round cylinders // R. I. Kinash, A. E. Kopylov // In: *Proceedings of NU Lvivska politechnika*, 2004. – 2004. – № 495 Theory and practice of construction. – P. 88–92. (in Ukrainian)
12. Suppression of the Karman vortex street and reduction in the frontal drag of a circular cylinder with two vortex cells / S. A. Isaev, P. A. Baranov, N. I. Vatin, , Y. V. Zhukova, A. G. Sudakov // Technical Physics Letters, 2014. 40 (8). P. 653–656.
13. Problems and methods of numerical and experimental investigation of high rise constructions' aerodynamics in the coastal region "sea–land" / S. A. Isaev, N. I. Vatin, Lebiga V. A., V. N. Zinoviev, K.–C. Chang, J.–J. Miao // In: *Magazine of Civil Engineering*, 2013. 37(2). P. 54–61.
14. Mushchanov V. P. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface / V. P. Mushchanov, G. V. Zubenko, I. V. Moskalenko // In: *Metal construction*. 2013. № 3. C. 235–243.
15. Tominaga, Y. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings / Y. Tominaga, et al. // In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. 96(10). P. 1749–1761.
16. DBNV.1.272: 2006. Load and impact. Design standards. – Instead of SNiP 2.01.07–85, except section 10; enter 2007-01-17. – K. : Ministry of Ukraine, 2006. – 78 p. (in Russian)
17. SNiP 2.01.07-85* Loads and impacts; SP 20.13330.2016. – Ed. official – M. : State standard, 2016. – 80 p. – (Set of rules). (in Russian)
18. Holmes, J. D. Wind Loading of Structures / J. D. Holmes. – Taylor & Francis e–Library, 2004. – 366 p. – Access mode : <https://doi.org/10.4324/9780203301647>
19. Eurocode 1. On the design. Part 1–4. General actions. Wind loads: DSTU–N B EN 1991-1-4: 2010 (EN 1991-1-4: 2005, IDT). – Official publishing house. – K. : Ministry of Ukraine, 2012. – (National standard of Ukraine). (in Ukrainian)
20. Solodar, M. B. Metal structures of exhaust towers // M. B. Solodar, M. V. Kuznetsova, Yu. S. Plishkin. – L. : Stroiizdat, 1975. – 186 c. (in Russian)
21. Godoy, Luis A., Portela, Genok A review of wind tunnels / Luis A. Godoy, Genok Portela 2002. – 19 p. – Access Mode: <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/elearning/tanques/documentos/pub/oureachreviewwind.pdf>.

22. Jahangiri, M. Computational buckling analysis of wind loaded cylindrical storage tanks / M. Jahangiri, M. H. Fakhrabadi, M. Jahangiri // *Majlesi Journal of Energy Management*. 2012. Vol. 1. № 4. P. 23–31.
23. Мушчанов, В. Ф. Напряжения в кровле резервуара, состоящего в группе, при действии ветра / The stresses of tank roof in the group of tanks under wind load / В. Ф. Мушчанов, А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев // *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2018. 5(68). P. 36–51.
24. Особенности обтекания ветровым потоком тел вращения в строительной аэродинамике / Е. В. Горюхов, В. Н. Васылев, Э. А. Лозинский, А. В. Зубенко, А. А. Дроздов // *Металлические конструкции*. 2015. № 3. С. 99–106.
25. Comparison of various k–e models and DSM applied to flow around a high–rise building : report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment / A. Mochida, Y. Tominaga, S. Murakami, R. Yoshie, T. Ishihara, R. Ooka, 2002. – 5 (2–4). – P. 227–244.
26. Development of CFD method for predicting wind environment around a high–rise building : part 3 : The cross comparison of results for wind environment around building complex in actual urban area using different CFD codes / Y. Tominagada, A. Mochida, K. Harimoto, H. Kataoka, R. Yoshie // *AIJ Journal of Technology and Design*. 2004. Vol. 2004(19). P. 181–184.
27. Development of CFD method for predicting wind environment around a high–rise building : part 2: the cross comparison of CFD results using various k–models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape / T. Shirasawa, T. Tominaga, R. Yoshie, A. Mochida, H. Yoshino, H. Kataoka, T. Nozu // *AIJ J. Technol. Des.* 2003. 18. P. 169–174 (in Japanese).
28. Зубенко, А. В. Модельные испытания вертикальных цилиндрических резервуаров и верификация численных исследований / А. В. Зубенко, А. А. Дроздов // *Металлические конструкции*. 2016. Т. 22, № 2. С. 91–97.
29. Руководство по расчету зданий и сооружений на воздействие ветра / Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1978. – 216 с.
30. Solid Works Flow Simulation 2012 : tutorial. – [S. n. : s. l.], 2012. – 266 p. – Режим доступа : <http://ebookbrowse.com/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial-pdf-d352903880>.
31. ВБН В 2.2–58.2–94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа / Державний Комітет України по нафті і газу. – Київ, [б. и.] : 1994. – 95 с.
32. Mushchanov V. P., The stress state of a tank shell in the group under wind load / V. P. Mushchanov, H. V. Zubenko, M. N. Tsepliaev // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 83(7). – p. 36–54 doi: 10.18720/MCE.83.5
22. Jahangiri, M. Computational buckling analysis of wind loaded cylindrical storage tanks / M. Jahangiri, M. H. Fakhrabadi, M. Jahangiri // In: *Majlesi Journal of Energy Management*. Vol. 1. № 4. P. 23–31.
23. Mushchanov, V. F. Stresses in the roof of a reservoir in the group under the action of the wind / V. F. Mushchanov, A. V. Zubenko, M. N. Tseplyaev // In: *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2018. 5(68). P. 36–51. (in Russian)
24. Features of wind flow around a body of revolution in building aerodynamics / E. V. Gorokhov, V. N. Vasilyev, E. A. Lozinsky, A. V. Zubenko, A. A. Drozdov // In: *Metal construction*. 2015. №3. С. 99–106. (in Russian)
25. Comparison of various k–e models and DSM applied to flow around a high–rise building: report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment / A. Mochida, Y. Tominaga, S. Murakami, R. Yoshie, T. Ishihara, R. Ooka, 2002. – 5 (2–4). – P. 227–244.
26. Development of CFD method for predicting wind environment around a high–rise building : part 3 : The cross comparison of results for wind environment around building complex in actual urban area using different CFD codes / Y. Tominagada, A. Mochida, K. Harimoto, H. Kataoka, R. Yoshie // In: *AIJ Journal of Technology and Design*. 2004. Vol. 2004(19). P. 181–184.
27. Development of CFD method for predicting wind environment around a high–rise building: part 2 : the cross comparison of CFD results using various k–models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape / T. Shirasawa, T. Tominaga, R. Yoshie, A. Mochida, H. Yoshino, H. Kataoka, T. Nozu // In: *AIJ Journal of Technology and Design*. 2003. 18. P. 169–174 (in Japanese).
28. Zubenko, A. V., Drozdov, A. A. Model testing of vertical cylindrical tanks and verification of numerical studies / A. V. Zubenko, A. A. Drozdov // In: *Metallic construction*. 2016. Vol. 22, No. 2. P. 91–97. (in Russian)
29. Guidelines for the calculation of buildings and structures on the effects of wind / Center. Scientific – investigation V. A. Kucherenko Inst of building. designs. – М. : Stroiizdat, 1978. – 216 p. (in Russian)
30. Solid Works Flow Simulation 2012 : tutorial. – [S. n. : s. e.], 2012. – 266 p. – Access mode: <http://ebookbrowse.com/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial-pdf-d352903880>.
31. VBN B 2.2–58.2–94. Vertical steel tanks for storage of oil and oil products with saturated vapor pressure not higher than 93.3 kPa / State Committee of Ukraine for oil and gas. – Kiev : [S. e.], 1994. – 95 p. (in Ukrainian)
32. Mushchanov, V. P., The Stress State of the Underground Wind Shield / V. P. Mushchanov, H. V. Zubenko, M. N. Tsepliaev // In: *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 83 (7). – p. doi: 10.18720 / MCE.83.5

Зубенко Анна Васильевна – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчет и проектирование инженерных сооружений, строительная аэродинамика.

Зубенко Ганна Василівна – асистент кафедри теоретичної і прикладної механіки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування інженерних споруд, будівельна аеродинаміка.

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