



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ  
METAL CONSTRUCTIONS**

2017, ТОМ 23, НОМЕР 2, 81–96  
УДК 624.042.41:624.014.7

(17)-0362-1

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОВИСАЮЩИХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, А. А. Дроздов**

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,*

*2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.*

*E-mail: zubienko\_anna@mail.ru*

*Получена 05 июня 2017; принята 23 июня 2017.*

**Анотация.** В публикации представлен анализ результатов научных исследований и нормативных документов воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, а именно вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов. На примере резервуара объемом 20 тыс. м<sup>3</sup> получены значения аэродинамических коэффициентов для вогнутой мембранной кровли резервуара для модели в масштабе 1:320. Путем продувки в аэродинамической трубе МАТ ДонНАСА выполнены верификационные расчеты для модели в программном комплексе Solid Works Flowork Simulation. Получены аэродинамические коэффициенты для резервуара в масштабе 1:1 в Solid Works для изолированного резервуара и для резервуара в группе из четырех объектов.

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

## **ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ КОЕФІЦІЕНТІВ ПРОВИСАЮЧИХ МЕМБРАННИХ ПОКРИТТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД**

**В. П. Мущанов, Г. В. Зубенко, А. О. Дроздов**

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,*

*2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.*

*E-mail: zubienko\_anna@mail.ru*

*Отримана 05 червня 2017; прийнята 23 червня 2017.*

**Аннотация.** У публікації надано аналіз результатів наукових досліджень і нормативних документів впливу вітрового навантаження на споруди, що мають кругову циліндричну поверхню, а саме вертикальних циліндричних резервуарів великих об'ємів. На прикладі резервуара об'ємом 20 тис. м<sup>3</sup>, отримані значення аеродинамічних коефіцієнтів для увігнутої мембранної покрівлі резервуара для моделі в масштабі 1:320. Шляхом продувки в аеродинамічній трубі МАТ ДонНАБА виконані верифікаційні розрахунки для моделі в програмному комплексі Solid Works Flowork Simulation. Отримано аеродинамічні коефіцієнти для резервуара в масштабі 1:1 в Solid Works для ізолюваного резервуара і для резервуара в групі з чотирьох об'єктів.

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

## RESEARCHES OF AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF DEFLECT MEMBRANE ROOF OF ENGINEER CONSTRUCTIONS

**Volodymyr Mushchanov, Hanna Zubenko, Andrey Drozdov**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,*

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

*E-mail: zubienko\_anna@mail.ru*

*Received 05 June 2017; accepted 23 June 2017.*

**Abstract.** The article deals with the output analysis of research investigations and normative documents of wind load influence on constructions, having circular cylindrical surface, specifically transverse cylindrical tank of high-cube. By the example of 20 000 m<sup>3</sup> high-cube tank it has been obtained aerodynamic factor for incurred by membrane roof of tank for scaled model 1:320. By wind-tunnel test of DonNACAE the verificatory calculations for the model have been performed in the complex IT system Solid Works Flowwork Simulation. Aerodynamic coefficients for the 1:1 scale tank in Solid Works, for isolated tank and tank in the four construction sites group have been obtained.

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

### Введение

Для расчета сооружения на ветровую нагрузку существуют несколько способов определения аэродинамических характеристик с использованием аналитических и экспериментальных данных. Точные аналитические решения в строительной аэродинамике охватывают очень ограниченный круг задач, т. к. четкую математическую модель для аэродинамических процессов получить затруднительно, и поэтому в большинстве случаев для новых и сложных сооружений выполняются исследования в аэродинамической трубе, которые являются надежным средством изучения процесса обтекания воздушным потоком зданий, сооружений и их комплексов. Также одним из развивающихся способов следует отметить компьютерное моделирование воздушного потока и определение основных аэродинамических характеристик для зданий и сооружений.

Одним из эффективных типов пространственных конструкций покрытий являются мембранные покрытия, состоящие из тонкого металлического листа, закрепленного на контуре. Используя в качестве материала сталь толщиной всего 2–5 мм, ими можно перекрывать пролеты свыше 300 м. Принцип работы покрытия висячего типа основывается на использовании возможности несущих материалов воспринимать в конструкции только растягивающие усилия, ве-

личина которых намного превосходит способности тех же материалов в конструкции на сжатие или на изгиб [23].

### Анализ результатов научных исследований и нормативных документов

Одним из критериев рационального сооружения является его малая материалоемкость. Снижение веса зданий дает экономию материалов, уменьшает трудоемкость возведения и транспортные расходы.

По конструктивным разработкам и экспериментально-теоретическим исследованиям мембранных конструкций из алюминия с учетом основных физико-механических свойств этого материала проводилась большая работа в ЦНИИСК им. Кучеренко. Эти задачи рассматриваются в трудах В. И. Трофимова, Н. М. Кирсанова [23, 27, 28, 29, 32, 33].

На рисунке 1 показаны некоторые реализованные объекты с провисающим мембранным покрытием: а) автобусный гараж в Новгороде на 300 машин, разработанный Ленпромстройпроектом, выполнено в виде шатрового покрытия со средней стойкой, на которую опирается внутреннее металлическое кольцо и закрепляются несущие нити из прокатной стали диаметром 40 мм; б) Бауманский рынок в г. Москва, построенный в 1977 г., покрытие осуществлено в виде однопо-

ясной круглой в плане оболочки положительной гауссовой кривизны; в) универсальный спортивный зал на 5 тыс. мест в Измайлове, Москва, покрытие выполнено из мембраны толщиной 2 мм, расход металла составил 58 кг на м<sup>2</sup>.

В книгах Е. В. Горохова [15] и П. Г. Еремеева [23] представлены результаты модельных экспериментальных исследований ветровых и снеговых нагрузок на технически сложные большепролетные покрытия со сложной геометрией.

Существующая методика расчета ветровой нагрузки на здания и сооружения с использованием аэродинамических формул была разработана в начале 70-х годов в ЦНИИСК им. Кучеренко на основе работ А. Давенпорта и А. Вайза и реализована в СНиП II-6-74 [39]. В 1985 г. при выпуске СНиП 2.01.07-85 [38] были упрощены выражения, описывающие динамическую реакцию сооружений при действии ветра [36].

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, Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича [30, 37, 40]. Работы Е. В. Горохова, М. А. Березина [15, 17] посвящены определению ветровых воздействий на здания и сооружения в аэродинамической трубе. В работах Кинаша, R. J. Holroyd, M. C. Hort, P. A. MacDonald [1, 3, 4, 5, 25, 26] описано экспериментальное моделирование взаимодействия ветрового потока с инженерными сооружениями в аэродинамической трубе.

Численному моделированию ветровых воздействий посвящены исследования S. Murakami, A. Moshida, Y. Tominaga, T. Shirasawa [6, 7, 10, 12] и др.

Перед определением моделирования на компьютере ветрового воздействия необходимо определить все переменные, которые удовлетворяют целям данного расчета, которые могут быть сопоставлены с экспериментом.

В методиках расчета в соответствии с нормативными требованиями [22, 34, 38] для определения ветровой нагрузки используют графики зависимости значений аэродинамических коэффициентов от положения угла образующей цилиндрической поверхности к направлению ветрового потока (рис. 2). При этом величины этих значений зависят от числа Рейнольдса. Для оте-

чественных норм коэффициенты по высоте резервуара определены при  $Re > 4 \cdot 10^5$  [34, 38], а для европейских норм коэффициенты определяются по трем значениям числа Рейнольдса, а именно  $Re = 2 \cdot 10^6$ ,  $Re = 10^7$ ,  $Re = 5 \cdot 10^5$  [22] (рис. 2). Для кровли значения коэффициентов не зависят от числа Рейнольдса.

По украинским нормам аэродинамический коэффициент определяется только для сферического типа кровли резервуара, является постоянным и зависит от соотношения стрелы подъема кровли  $f$  к диаметру резервуара  $d$  [20], по нормам Еврокода определяются три значения А, В, С (рис. 3). Для рассматриваемого в статье вертикального цилиндрического резервуара соотношение  $f/d = 0,45$ . На рис. 3 показана схема определения аэродинамического коэффициента для сферического типа кровли резервуара по ДБН В.1.272:2006 [20] и по EN 1991-1-4:2010 [22].

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

- недостаточно изучены нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары для новых типов кровель, в т. ч. с провисающими мембранными покрытиями;
- недостаточно изучены нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары и в составе группы, несмотря на то что на большинстве нефтехранилищ такая компоновка является преимущественной.

Авторами представлены [44, 45] исследования по ветровому воздействию для группы вертикальных цилиндрических резервуаров со сферическим покрытием объемом 20 тыс. м<sup>3</sup> для стенки, в которой проанализированы эквивалентные напряжения, которые отличаются не более чем на 5 % от полученных по Еврокоду, в верхних поясах – до 20 % для изолированного резервуара. Отличие НДС верхних поясов вызвано тем, что эпюра ветрового давления согласно Еврокоду для рассматриваемого типоразмера резервуара, ввиду относительно малых значений возникающих напряжений, не учитывает отрывающее ветровое давление в зоне стыка кровли и стенки. Максимальные значения напряжений в стенке ВЦР, состоящего в группе,

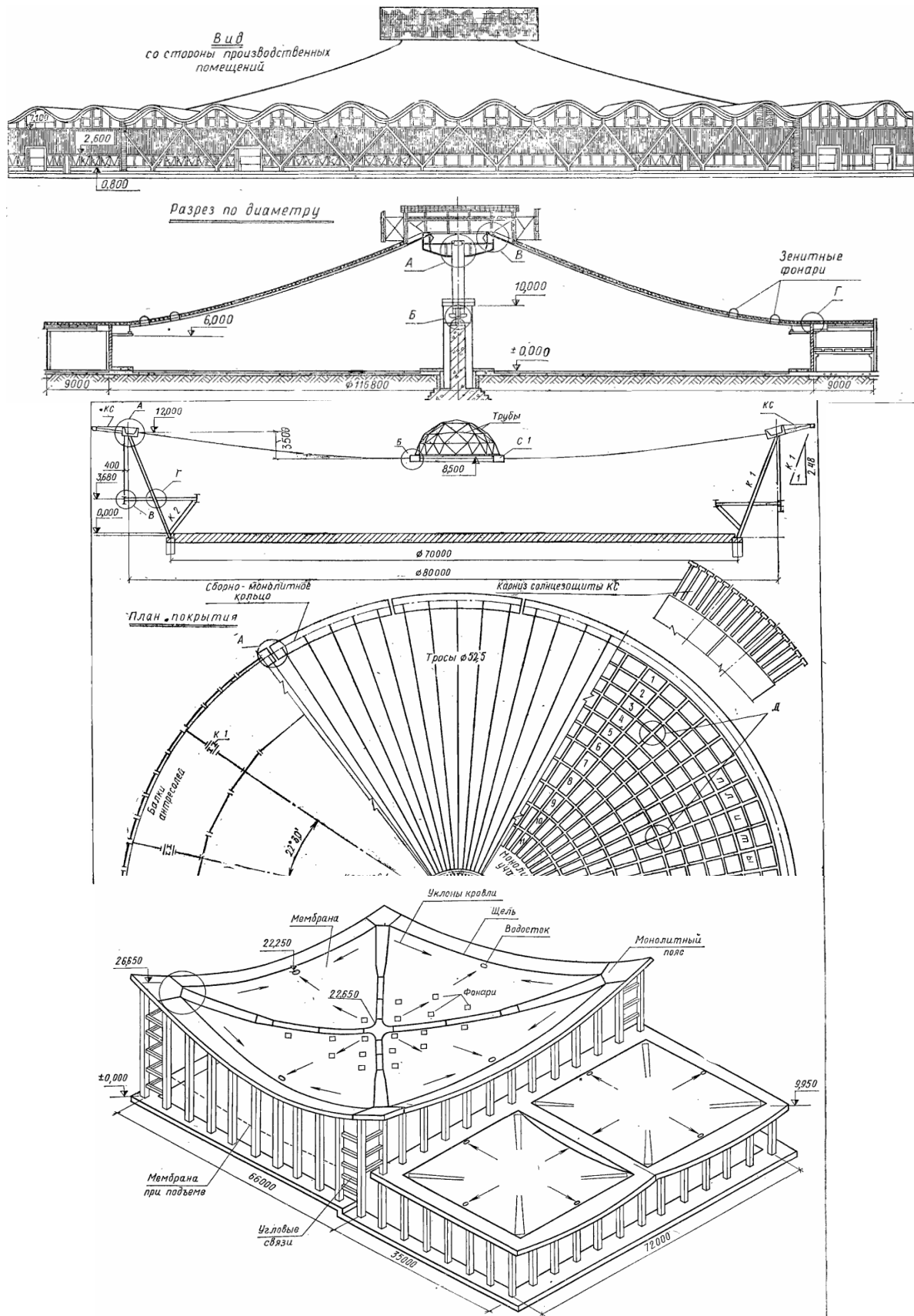
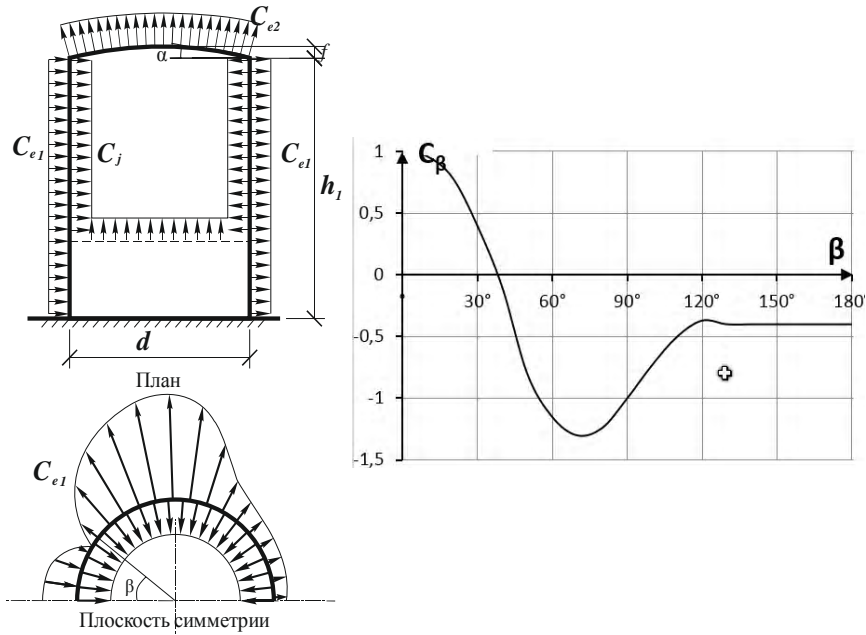
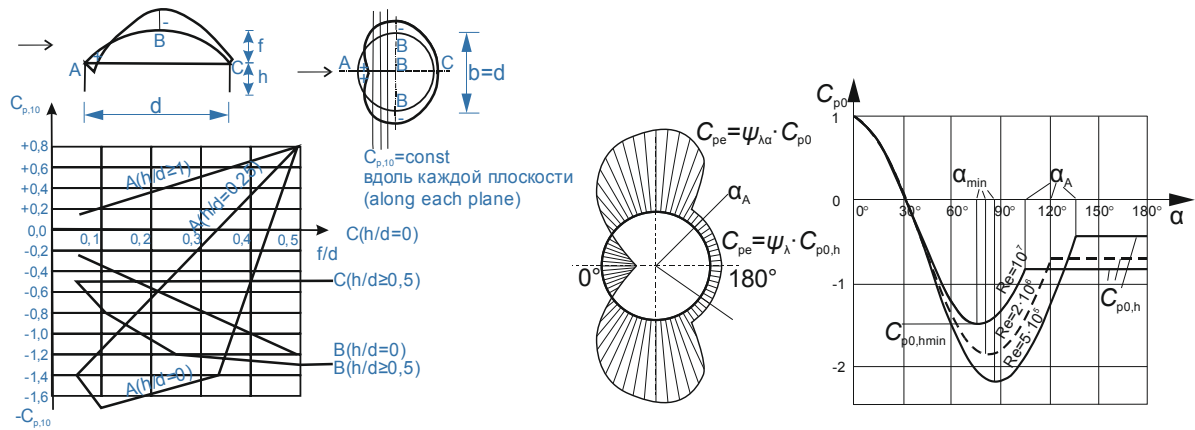


Рисунок 1. Реализованные сооружения с мембранным провисающим покрытием.

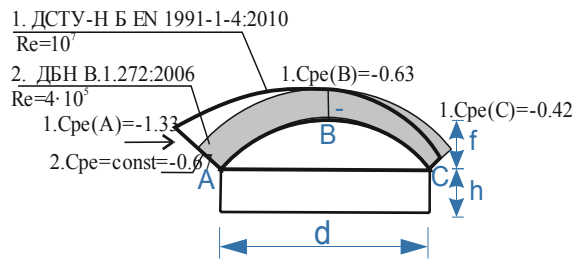
а)  $Re > 4 \cdot 10^5$



б)  $Re = 2 \cdot 10^6, Re = 10^7, Re = 5 \cdot 10^5$



**Рисунок 2.** Нормирование аэродинамических коэффициентов  $C_{\beta}$ , определяемых в соответствии с нормативными документами: а) по ДБН В.1.272:2006 [20], где  $C_{e1}$  – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара;  $C_{e2}$  – аэродинамический коэффициент для кровли резервуара;  $C_j$  – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара, применяемый в случае опущенной плавающей кровли или отсутствия кровли;  $d$  – диаметр вертикального цилиндрического резервуара;  $h_1$  – высота резервуара; б) по EN 1991-1-4:2010 или СП 20.13330.2011 [22, 34], где  $C_{pe}$  – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара.



**Рисунок 3.** Аэродинамический коэффициент для сферической кровли резервуара.

из всех рассматриваемых случаев загрузений, возникают в резервуаре № 2 при угле атаки ветра  $45^\circ$ . НДС стенки при действии неблагоприятной ветровой нагрузки на ВЦР, состоящий в группе из 4 объектов, значительно отличается от напряжений, возникающих в стенке изолированного ВЦР. В целом пиковые значения эквивалентных напряжений отличаются на 48 % по сравнению с изолированным ВЦР по Еврокоду и на 41 % по сравнению с изолированным ВЦР по результатам

численного моделирования. Таким образом, рядом расположенные объекты значительно влияют на НДС стенки ВЦР, что требует разработки методики учета этого явления.

Поэтому поставлены следующие задачи:

- выполнить исследование ветровой нагрузки для изолированного одиночного ВЦР с провисающей кровлей для соотношений стрелы подъема ( $f$ ) к диаметру сооружения ( $d$ )  $f/d = 1/30$  и  $f/d = 1/40$ ;
- получить значения аэродинамических коэффициентов для вогнутой кровли отдельно стоящего вертикального цилиндрического резервуара, представленного в виде кругового цилиндра с заданными исходными геометрическими и термодинамическими параметрами в масштабе 1:1 и сравнить с полученными экспериментальными значениями [21];
- выполнить исследование ветровой нагрузки для ВЦР с провисающей кровлей, находящегося в группе из четырех резервуаров при различных направлениях угла атаки ветровой нагрузки.

Для решения сформированных выше задач выполнен верификационный расчет для модели ВЦР в программном комплексе Solid Works Flow Simulations, результаты которого приведены в статье [8, 21].

### Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик вертикальных цилиндрических резервуаров

Учитывая сложность, многофакторность и непредсказуемость результатов численного моделирования в среде Solid Works Flow Simulation обтекания ветровым потоком группы 4 резервуаров, для получения качественной картины явления предварительно был выполнен эксперимент в аэродинамической трубе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры МАГ-1.

В аэродинамической трубе для модели резервуара с плоской кровлей выполнялся тестовый эксперимент для определения числа Рейнольдса, которое является критерием подобия при проведении аэродинамических экспериментов [40].

На рисунке 4 показаны схема с размерами компоновки и установка моделей на поворотном круге с градуировкой.

Для соблюдения требований соотношение площади проекции экспериментальной модели к площади поперечного сечения рабочей части аэродинамической трубы не должно превышать 3% [15]. Также учитывая реальные натурные размеры застройки (в соответствии с требованиями ВБН расстояние между резервуарами должно составлять 0,5D), соответственно при компоновке группы 4 резервуаров объемом 20 тыс. м<sup>3</sup> общей длиной 100 м (рис. 4) и особенности компоновки рабочей части аэродинамической трубы МАГ-1 ДонНАСА шириной 1 м был выбран масштаб модели  $M = 1:320$ .

По плану экспериментальных исследований в аэродинамической трубе МАГ-1 ДонНАСА предусматривалось определение коэффициентов ветрового давления ( $C_{pi}$ ) в 49 опорных точках на модели резервуара (рис. 5). 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 направлениям ( $\beta = 0, 45, 90, 150, 180, 270^\circ$ ).

На рисунке 5 показана схема модели с нумерацией дренажных точек, в которых выполнялись измерения ветрового давления, и на рис. 4 фото физической модели резервуара с вогнутой провисающей кровлей, для которой выполнялось исследование.

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

$$Re = \frac{L \cdot U(z_e)}{\nu}, \quad (1)$$

где  $L$  – диаметр;

$\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,

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

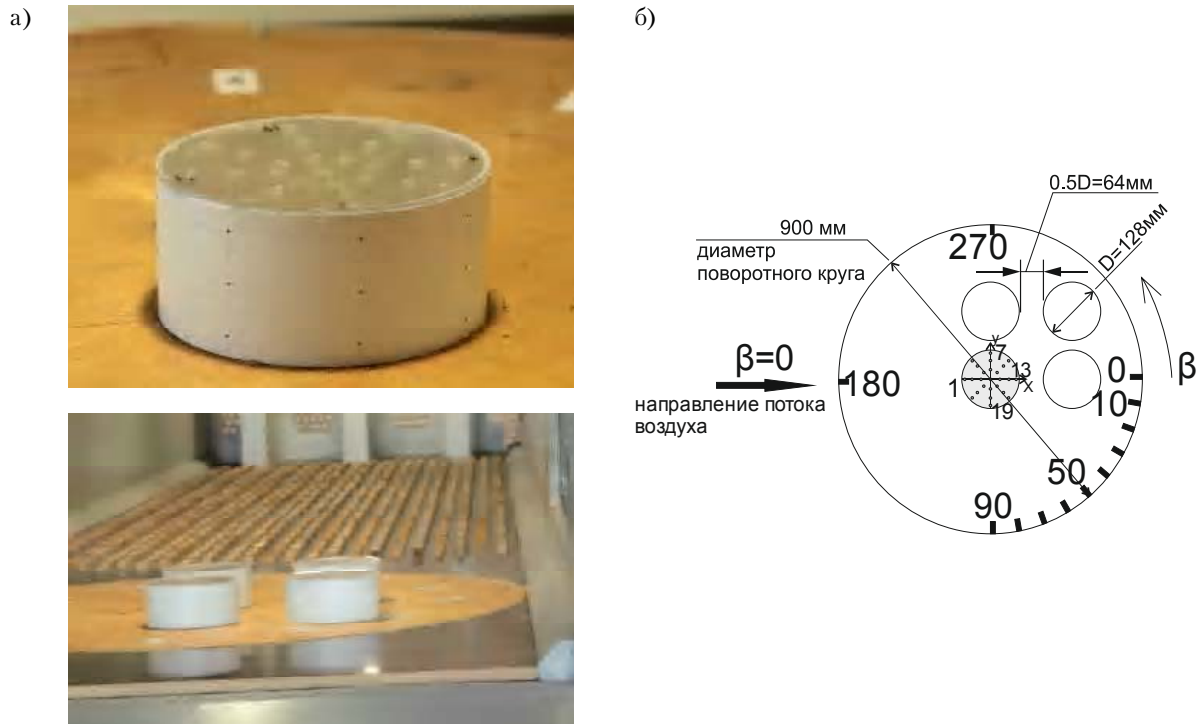
$U(z_e)$  – пиковое значение скорости ветра,

$U(z_e) = 13,2...14,9 \text{ м/с}$ ;

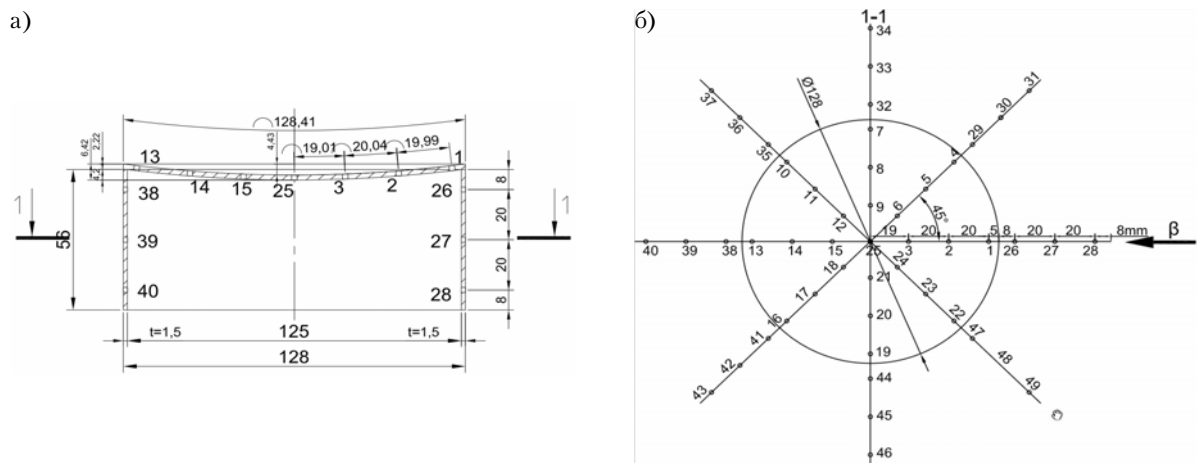
$Re \approx 1,28 \cdot 10^5$  – число Рейнольдса.

Для оценки лобового сопротивления скоростного потока ветра проводилась продувка: 1) модели с плоской кровлей для физической модели с дренажными отверстиями; 2) для модели установленной на трехкомпонентных аэродинамических тензометрических весах [16, 21]; 3) численное моделирование в Solid Works Flow Simulation [8, 21].

Каждый цикл экспериментальной продувки (заданный угол атаки, скорость ветрового пото-



**Рисунок 4.** Компоновка группы вертикальных цилиндрических резервуаров: а) физическая модель с дренажными отверстиями, б) схема расположения модели на поворотном круге в аэродинамической трубе:  $D = 128 \text{ мм}$  – диаметр модели;  $0,5D$  – минимальное расстояние при группировании объектов.



**Рисунок 5.** Схема исследуемой модели ВЦР с расстановкой опорных точек: а) поперечный разрез модели, б) модель в плане.

ка) состоял из следующих этапов: запуск ветроколеса с шестидесятисекундной нормализацией скорости ветрового потока, измерение статического воздушного давления, преобразование его в электрический сигнал, обработка и отображение полученных результатов с использованием авто-

матизированной высокопродуктивной информационно-вычислительной системы «SCAD» [15]. В ее состав входят: пневмокоммутатор с датчиками давления, высокопроизводительный компьютер с системой преобразования аналогового сигнала в цифровой, а также соответствующая

коммутационная аппаратура и источники электрического питания. Один цикл опроса занимает 1 с. В период одного цикла измерений каждая из дренажных точек опрашивалась двенадцать раз. В дальнейшей обработке соответствующие первичные сигналы по каждой дренажной точке усреднялись. После каждого поворота исследуемой модели на  $\Delta\beta = 10^\circ$  производился запрос сигнала с каждой дренажной точки, при нулевой скорости воздушного потока выдерживался так называемый «0», затем запускалась аэродинамическая труба, и скорость воздуха доводилась до скорости около 15 м/с, далее скорость удерживалась постоянной не менее 60 с, при которой также производился опрос дренажных точек.

На основании полученных данных сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформирована расчетная схема для расчета одиночного и группы ВЦР в среде Solid Works 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 кровли резервуара (сравнение результатов экспериментальных данных и численных исследований обеспечивают сходимость в пределах 15 % для основных расчетных сечений).

#### Численный эксперимент. Размер домена расчетной области

Из опыта исследований в аэродинамических трубах полагают, что сооружение высотой  $H$ , влияет на расстояние почти до  $10H$ . И как показали тестовые расчеты Японского Института Архитектуры [6, 7, 10, 12], 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 группы при высоте сооружения  $24,89 \text{ м} \approx 25,00 \text{ м}$  про-

цент загромождения составит 2,09 %. 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  $\geq 15H$ . Ниже на рисунке показаны схемы домена.

В среде Solid Works Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических процессов были созданы расчетные схемы для одиночного ВЦР и группы из 4 резервуаров в масштабе 1:320, для которого выполнялся эксперимент в аэродинамической трубе МАТ-1 ДонНАСА, и в масштабе 1:1. На рис. 6 показаны размеры расчетной области для изолированного резервуара, и резервуара, состоящего в группе из 4 объектов.

#### 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  $L(z)$  по формулам (8, 7, 12) [44], по нормам Еврокода, т. к. для норм Украины [20] и РФ [34] энергия пульсаций скорости описывается спектром Давенпорта, который не учитывает зависимость энергии турбулентных пульсаций ветра от высоты, и интегральный продольный масштаб турбулентности принимает постоянное значение  $L_u(z) = 1 \text{ 200 м}$ , интенсивность турбулентности в явном виде не фигурирует. Значение скорости для модели составляло 13,2 м/с, для резервуара в масштабе 1:1 скорость определялась по формуле (2).

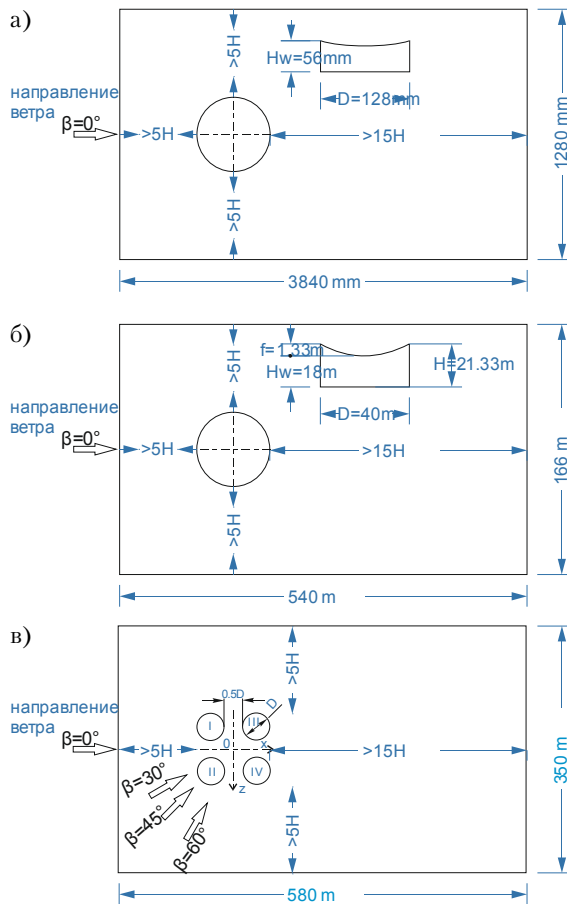
$$\begin{aligned} v_m(z) &= c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = \\ &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot v_{b0} = 0,156 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot v_{b0}, \end{aligned} \quad (2)$$

$c_r(z)$  – коэффициент неровности поверхности, зависит от типа местности и определяется:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,156 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (3)$$

$k_r$  – коэффициент местности, зависит от коэффициента шероховатости  $z_0$ , и определяется:





**Рисунок 6.** Размер расчётной области для изолированного резервуара, и в группе из 4 объектов: а) изолированный резервуар масштабная модель ВЦР 1:320; б) изолированный резервуар масштабная модель ВЦР 1:1; в) резервуар в группе.

$$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}, \quad (4)$$

при  $z_0 = 0,003$  для типа местности I (открытые поверхности, море или прибрежная зона) по нормам Еврокода [22];

$z_{0,II}$  – коэффициент шероховатости для типа местности II,  $z_{0,II} = 0,05$  м;

$c_0(z)$  – коэффициент рельефа, для основной скорости  $c_0(z) = 1$ ;

$c_e(z)$  – коэффициент экспозиции;

$V_{b0}$  – базовая скорость, для типа местности I составляет 30 м/с;

$$k_r = 0,19 \left( \frac{0,003}{0,05} \right)^{0,07} = 0,156.$$

При назначении размера сетки конечного объема для решения CFD задачи руководствовались рекомендациями А. Moshida, Y. Tomiyaga [6] из Японского Института Архитектуры. А именно разрешение сетки должно составлять 1/10 от наиболее низкого сооружения в группе (около 0,5...5,0 м) в области целевого сооружения.

Соотношение сеток для последовательных систем сеток не должно превышать 4 [1].

Для определения размера сетки в области CFD был проведен верификационный расчет в трехмерной постановке для экспериментальной модели (рис. 5) для значений числа Рейнольдса, полученного при продувке модели в аэродинамической трубе.

### Анализ результатов по эксперименту

При сравнении полученных значений аэродинамических коэффициентов для отдельно стоящего вертикального цилиндрического резервуара, представленного в виде кругового цилиндра с заданными исходными геометрическими и термодинамическими параметрами в масштабе 1:1 и с действующими нормативными документами, а именно Еврокодом, для стенки отличаются максимально в зоне отрицательного давления на 50 % [45].

Ниже представлены результаты, полученные при проведении физического эксперимента в аэродинамической трубе и численного исследования в программе Solid Works Flow Simulation по распределению по кровле модели ВЦР аэродинамических коэффициентов для одного ВЦР с вогнутой провисающей кровлей (рис. 7) и состоящего в группе из 4 объектов (рис. 8).

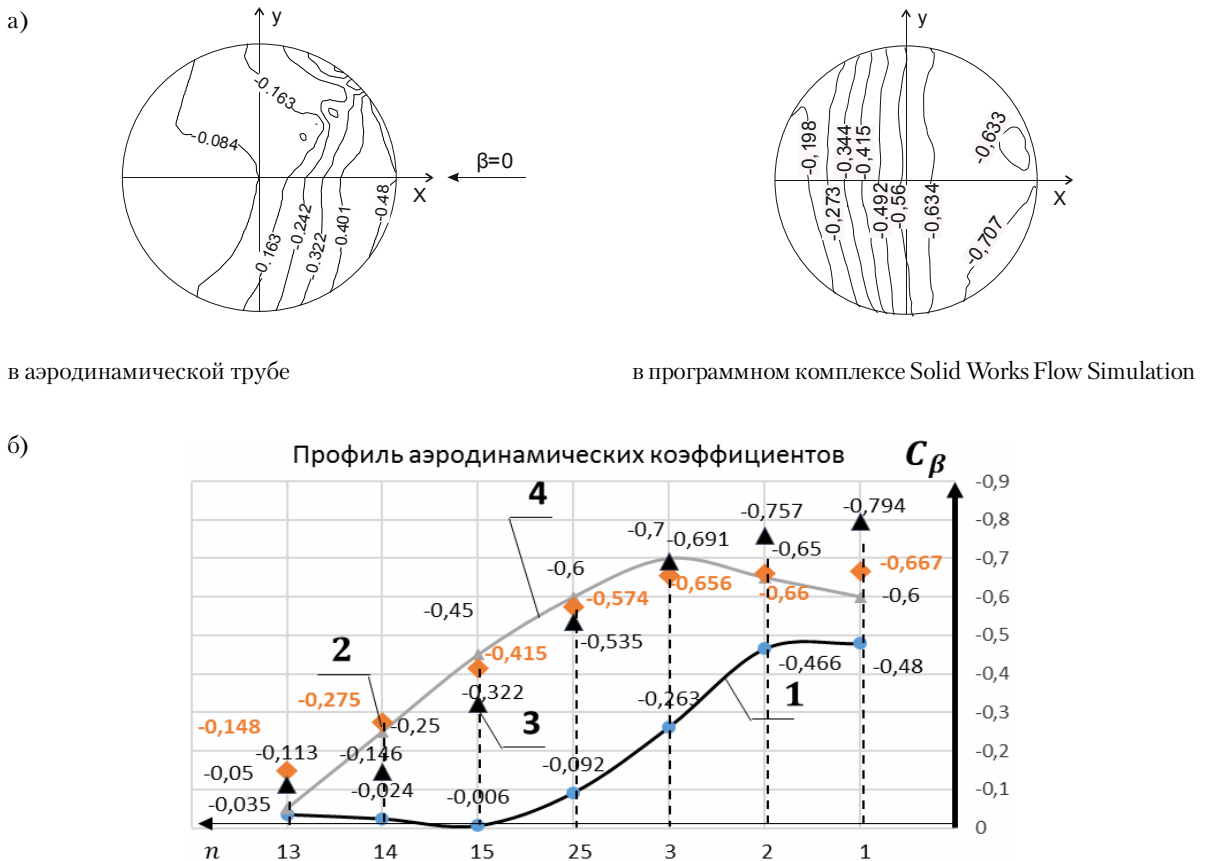
Т. к. для новых типов кровель, а именно провисающих мембранных покрытий, в нормативных документах [20, 22] нет рекомендаций по определению аэродинамических коэффициентов, поэтому использовались результаты экспериментальных исследований ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко [33]. На рис. 7 показаны изополя и график профиля распределения по кровле аэродинамических коэффициентов для модели ВЦР в масштабе 1:320 для изолированного резервуара с вогнутой провисающей кровлей.

Анализируя полученные аэродинамические коэффициенты для изолированного одиночного резервуара для рассматриваемой модели,

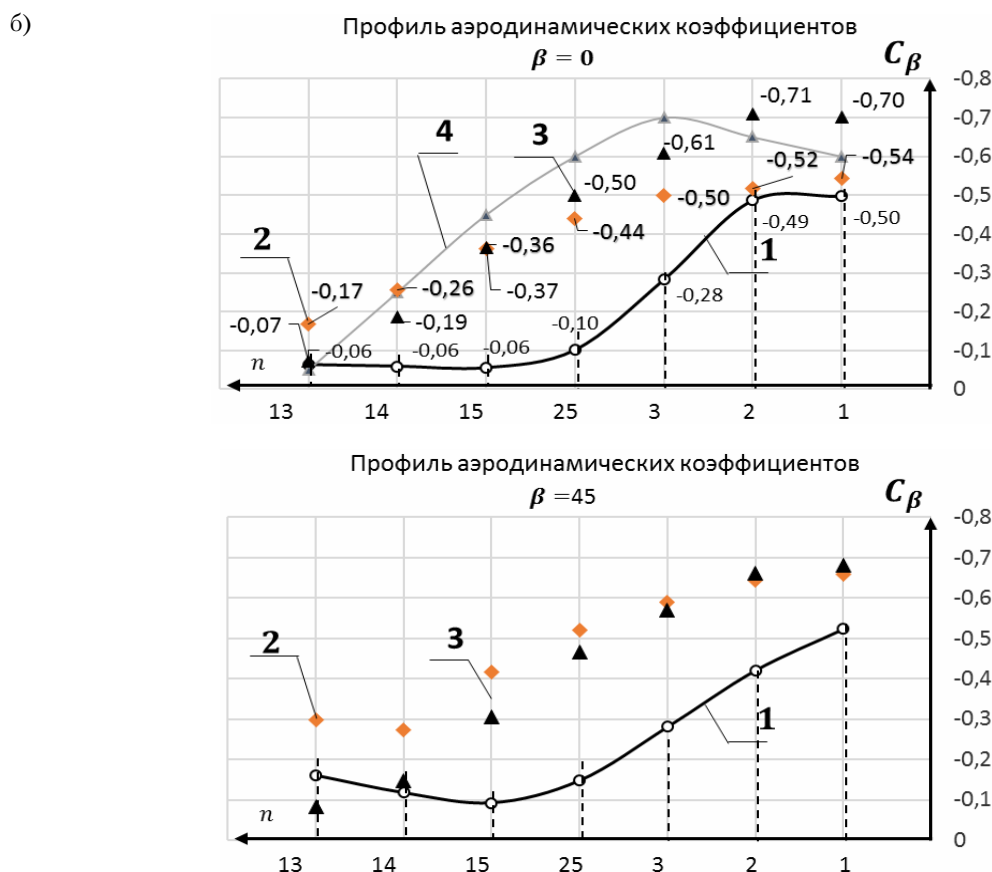
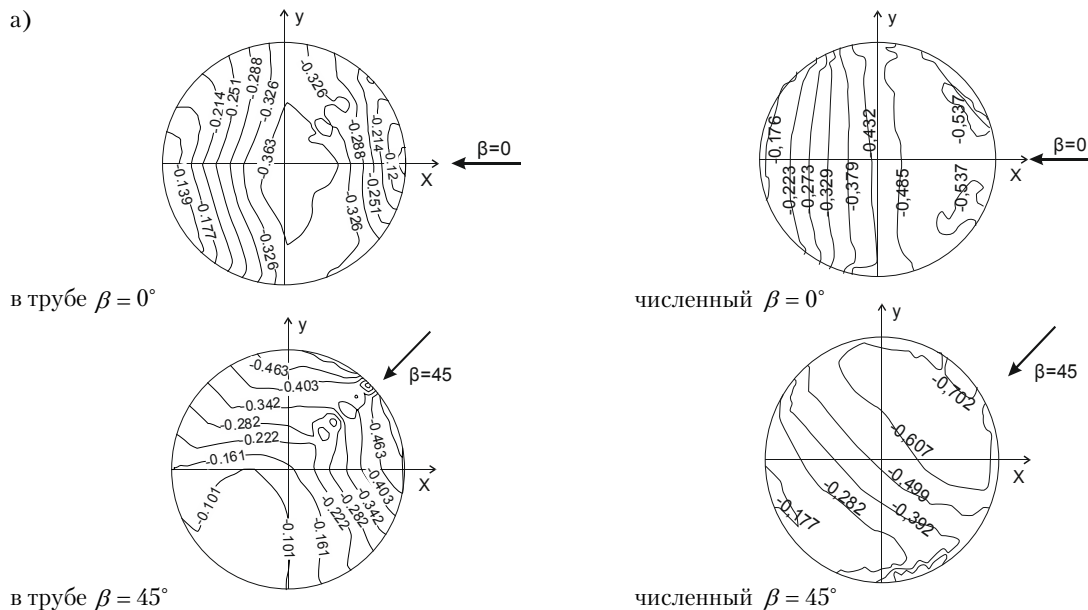
можем сделать вывод о качественной сходимости полученных результатов. Расхождение значений для расчетной модели резервуара, полученные численно (рис. 7 график 2, 3), отличаются от значений модели, полученных экспериментально (рис. 7 график 4) в пределах 6–10 %.

На основании полученных данных сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформирована расчетная схема для расчета группы ВЦР в среде Solid Works Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических процессов. На рис. 8 показаны изополя и профиль графика распределения аэродинамических коэффициентов при углах атаки 0 и 45° для I резервуара, состоящего в группе.

Анализируя результаты по рис. 8 для экспериментальной модели вертикального цилиндрического резервуара в масштабе 1:320 картина сходимости качественная, расхождение значений находится в пределах 30 %, для модели резервуара в масштабе 1:1 в ключевых точках, для которых даны рекомендации по определению коэффициентов, а именно ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко [33], расхождение со значениями численного эксперимента составляет 6–10 %, что говорит о том, что исходные начальные параметры скорости  $v_m(z)$ , интенсивности турбулентности  $I_v(z)$  и продольного масштаба турбулентности  $L(z)$ , а также размеры расчетной области и размеры сетки составлены корректно.



**Рисунок 7.** Сопоставление распределения аэродинамических коэффициентов для изолированного резервуара с вогнутой провисающей кровлей (угол атаки ветрового потока  $\beta = 0^\circ$ ): а) изополя распределения коэффициентов по кровле для модели в М 1:320; б) профиль распределения коэффициентов по кровле, где 1 – значения для модели в М 1:320, полученные при проведении эксперимента в аэродинамической трубе; 2 – значения для модели в М 1:320, полученные при численном моделировании в Solid Works Flow Simulation; 3 – значения для расчетной модели в М 1:1, полученные при численном моделировании в Solid Works Flow Simulation; 4 – значения для мембранной кровли, полученные по обобщенным результатам ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко аэродинамических испытаний, при соотношениях  $h/D = 1/4$ ,  $f/D = 1/30$  [33],  $n$  – номера точек, в которых проводилось измерение давления (рис. 4).



**Рисунок 8.** Сопоставление распределения аэродинамических коэффициентов по кровле резервуара в группе с вогнутой провисающей кровлей: а) изополя распределения коэффициентов по кровле  $\beta = 0, 45^\circ$  для модели в масштабе 1:320; б) профиль распределения коэффициентов по кровле  $\beta = 0, 45^\circ$ , где 1 – значения для модели в М 1:320, полученные при проведении эксперимента в аэродинамической трубе; 2 – значения для модели в М 1:320, полученные при численном моделировании в Solid Works Flow Simulation; 3 – значения для модели в М 1:1, полученные при численном моделировании в Solid Works Flow Simulation; 4 – значения по ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко [33].

### Выводы

- 1) На основании полученных данных сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформирована расчетная схема для расчета одиночного и группы ВЦР объемом 20 тыс. м<sup>3</sup> с вогнутой провисающей кровлей в среде Solid Works Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических процессов. Основной особенностью этой процедуры стало определение размера области компьютерного моделирования составляющей.
- 2) Предложен методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических

процессов обтекания ветровым потоком кровли резервуара (сравнение результатов экспериментальных данных и численного исследования обеспечивает сходимость в пределах 6–10 % для основных расчетных сечений).

- 3) Для группы из 4 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 Еврокоду.

### Литература

1. Recommendations on the Use of CFD in Wind Engineering [Текст] / J. Franke, C. Hirsch, A. G. Jensen [et al.] // Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics: COST C14 – Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment, Rhode-Saint-Genèse / J.P.A.J. van Beek (Ed.). – Rhode-Saint-Genèse : Von Karman Institute for Fluid Dynamics. – P. 1.1.–1.11.
2. Holroyd, R. J. On the behaviour of open-topped oil-storage tanks in high winds (Part 1) [Текст] / R. J. Holroyd // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1983. 12. P. 329–352.
3. Hort, M. C. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks [Текст] / M. C. Hort, A. G. Robbins // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002. Vol. 90. P. 1321–1348.
4. MacDonald, P. A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures [Текст] / P. A. MacDonald, K. C. S. Kwok, J. D. Holmes // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1988. 31. P. 165–187.
5. MacDonald, P. A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping [Текст] / P. A. MacDonald, K. C. S. Kwok, J. D. Holmes // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. 34. P. 77–95.
6. Comparison of various  $k-\varepsilon$  models and DSM applied to flow around a high-rise building – Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment [Текст] / A. Mochida, Y. Tominaga, S. Murakami [et al.] // Wind Struct. 2002. 5 (2–4). P. 227–244.
7. Murakami, S. Computational wind engineering [Текст] / S. Murakami // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. Volume 36, Part 1. P. 517–538.

### References

1. Franke, J.; Hirsch, C.; Jensen, A. G.; Krüs, H. W.; Schatzmann, M.; Westbury, P. S.; Miles, S. D.; Wise, J. A.; Wright, N. G. Recommendations on the Use of CFD in Wind Engineering. In: *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics: COST C14 – Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment, Rhode-Saint-Genèse / J.P.A.J. van Beek (Ed.)*. Rhode-Saint-Genèse: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, pp. 1.1.–1.11.
2. Holroyd, R. J. On the behaviour of open-topped oil-storage tanks in high winds (Part 1). In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 12, pp. 329–352.
3. Hort, M. C.; Robbins, A. G. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, Vol. 90, pp. 1321–1348.
4. MacDonald, P. A.; Kwok, K. C. S.; Holmes, J. D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 31, pp. 165–187.
5. MacDonald, P. A.; Kwok, K. C. S.; Holmes, J. D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 34, pp. 77–95.
6. Mochida, A.; Tominaga, Y.; Murakami, S.; Yoshie, R.; Ishihara, T.; Ooka, R. Comparison of various  $k-\varepsilon$  models and DSM applied to flow around a high-rise building – Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. In: *Wind Struct.*, 2002, 5 (2–4), pp. 227–244.
7. Murakami, S. Computational wind engineering. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, Volume 36, Part 1, pp. 517–538.
8. Mushchanov, Volodymyr; Zubenko, Ganna; Moskalenko, Ivan. Numerical simulation of wind pressure

8. Mushchanov, Volodymyr. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface [Текст] / Volodymyr Mushchanov, Ganna Zubenko, Ivan Moskalenko // *Металлические конструкции*. 2013. Том 19, № 3. С. 173–181.
9. Mushchanov, Volodymyr. Wind load definition on vertical cylindrical tank with membrane roof in the group [Текст] / Volodymyr Mushchanov, Hanna Zubenko // *Металлические конструкции*. Том 20, № 4. С. 235–243.
10. Development of CFD Method for Predicting Wind Environment around a High-Rise Building : Part 2 : The cross comparison of CFD results using various k- $\epsilon$  models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape (Environmental Engineering) / T. Shirasawa, Y. Tominaga, R. Yoshie [et al.] // *Journal of Technology and Design, AIJ*. 2003. No.18. P. 169–174.
11. Solid Works Flow Simulation 2012 [Электронный ресурс]: Tutorial. – [S. n.: s.l.], 2012. – 266 p. – Режим доступа : <http://ebookbrowse.com/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial-pdf-d352903880>.
12. Tominaga, Y. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex [Текст] / Y. Tominaga, A. Mochida, T. Shirasawa et al. // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2004. Vol. 3. P. 63–70.
13. ВБН В 2.2-58.1-94. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [Текст]. – Вводяться вперше ; введені в дію з 01.04.1994. – Київ : Державний Комітет України по нафти і газу, 1994. – 150 с.
14. 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.
15. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций [Текст] / М. А. Березин, В. В. Катюшин. – Новосибирск : Олденполиграфия, 2003. – 140 с.
16. Гордеев, В. Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения [Текст] / В. Н. Гордеев, А. И. Лантух-Лященко, В. А. Пашинский, А. В. Перельмутер, С. Ф. Пичугин ; под общ. ред. А. В. Перельмутера. – 3-е изд., перераб. – М. : АСВ, СКАД СОФТ, ДМК Пресс, 2009. – 528 с.
17. 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.
18. Горохов, Е. В. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Мушанов, Р. И. Кинаш, А. В. Шимановский, И. Н. Лебедич. – Макеевка : РИО ДонНАСА, 2008. – 405 с.
19. Особенности обтекания ветровым потоком тел вращения в строительной аэродинамике [Текст] / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, Э. А. Лозинский [и on a vertical cylindrical tank surface. In: *Metal Constructions*, 2013, Vol. 19, No. 3, pp. 173–181.
9. Mushchanov, Volodymyr; Zubenko, Hanna. Wind load definition on vertical cylindrical tank with membrane roof in the group. In: *Metal Constructions*, Vol. 20, No. 4, pp. 235–243.
10. Shirasawa, T., Tominaga, Y., Yoshie, R., Mochida, A., Yoshino, H., Kataoka, H., Nozu, T. Development of CFD Method for Predicting Wind Environment around a High-Rise Building: Part 2: The cross comparison of CFD results using various k- $\epsilon$  models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape (Environmental Engineering). In: *Journal of Technology and Design, AIJ*, 2003, No. 18, pp. 169–174. (in Japanese)
11. Solid Works Flow Simulation 2012: Tutorial. [S. n.: s.l.], 2012. 266 p. Mode of access: <http://ebookbrowse.com/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial-pdf-d352903880>.
12. Tominaga, Y.; Mochida, A.; Shirasawa, T.; Yoshie, R.; Kataoka, H.; Harimoto, K.; Nozu, T. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex. In: *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2004, Vol. 3, pp. 63–70.
13. VBN V 2.2-58.1-94. Development of crude oil and refined products stores having saturated vapor pressure not above 93,3 kPa. Kyiv: Oil and residue gas State Committee of Ukraine, 1994. 150 p. (in Ukrainian)
14. VBN V 2.2-58.294. Vertical steel tanks, holding oil and oil-products, having vapour pressure not above 93,3 kPa. Kyiv: Derzhkomnaftogaz, 1994. 95 p. (in Ukrainian)
15. Berezin, M. A.; Katiushin, V. V. Aerodynamic characteristics atlas of engineering constructions. Novosibirsk: Oldenpoligrafija, 2003. 140 p. (in Russian)
16. Gordeev, V. N.; Lantuh-Liashchenko, A. I.; Pashinsky, V.A.; Perelmuter, A. V.; Pichugin, S. F.; Edited by Perelmuter, A. V. Loads and actions on buildings and constructions. 3rd Edition, revised. Moscow: ASV, SKAD SOFT, DMK Press, 2009. 528 p. (in Russian)
17. Gorokhov, Ye. V.; Kuznetsov, S. G. Experimental methods of determination of wind load on buildings and constructions. Donetsk: NordPress, 2009. 169 p. (in Russian)
18. Gorohov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Kinash, R. I.; Shimanovskiy, A. V.; Lebedich, I. N. Construction of fixed-site coverings over terraces. Makeevka: RIO DonNASEA, 2008. 405 p. (in Russian)
19. Gorokhov, Yevgen; Vasylev, Volodymyr; Lozinsky, Eduard; Zubenko, Hanna; Drozdov, Andrey Features of the Flow Around the Wind Flow of Solids of Revolution in Construction Air Mechanics. In: *Metal Constructions*, 2015, Vol. 21, No. 2, pp. 99–106. (in Russian)
20. DBN V.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and

- др.] // *Металлические конструкции*. 2015. Том 21, № 2. С. 99–106.
20. 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 2.01.07-85 ; надано чинності 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с.
  21. Зубенко, А. В. Модельные испытания вертикальных цилиндрических резервуаров и верификация численных исследований [Текст] / А. В. Зубенко, А. А. Дроздов // *Металлические конструкции*. 2016. Том 22, № 2. С. 91–97.
  22. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–4. Загальні дії. Вітрові навантаження [Текст] (EN 1991-1-4:2005, IDT). – Уведено вперше; чинні 01.07.2013. – К. : Мінрегіон України, 2013. – 165 с. – (Національний стандарт України).
  23. Еремеев, П. Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений [Текст] : монография / П. Г. Еремеев. – М. : АСВ, 2009. – 336 с.
  24. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко [и др.]. – М. : СКАД СОФТ, 2009. – 647 с. – ISBN 978-5-903683-07-9.
  25. Кинаш, Р. И. Аэродинамические исследования четырех круглых цилиндров [Текст] / Р. И. Кинаш, А. Е. Копылов // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва. 2004. № 495. С. 88–92.
  26. Кинаш, Р. И. Исследование аэродинамических параметров системы из двух круговых цилиндров [Текст] / Р. И. Кинаш, А. Е. Копылов // *Вестник Донбасской национальной академия строительства и архитектуры*. 2007. Вып. 2007–6(68). С. 32–40.
  27. Кирсанов, Н. М. Висячие и вантовые конструкции [Текст] : Учеб. пособие для вузов / Н. М. Кирсанов. – М. : Стройиздат, 1981. – 158 с.
  28. Кирсанов, Н. М. Висячие покрытия производственных зданий [Текст] / Н. М. Кирсанов. – М. : Стройиздат, 1990. – 128 с. – ISBN 5-274-01020-2.
  29. Лессиг, Е. Н. Листовые металлические конструкции [Текст] / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М. : Изд-во лит. по строит., 1970. – 488 с.
  30. Справочник по динамике сооружений [Текст] / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М. : Стройиздат, 1972. – 512 с.
  31. Махінько, А. В. Ймовірнісний розрахунок баштових опор зв'язку = Probabilistic Design of Communication Tower [Текст] : монографія / А. В. Махінько. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – 410 с. – ISBN 978-966-616-096-9.
  32. Мембранные конструкции зданий и сооружений [Текст] : Справочное пособие. В 2-х ч. Ч. 2 / Под ред. В. И. Трофимова и П. Г. Еремеева; ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1990. – 198 с. – ISBN 5-274-01730-4.
  33. effects. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
  21. Zubenko, Hanna; Drozdovm Andrey. The Model Tests of Vertical Cylindrical Tanks and a Verification of Numerical Researches. In: *Metal Constructions*, 2016. Vol. 22, No. 2, pp. 91–97. (in Russian)
  22. DSTU-N B EN 1991-1-4:2010. Eurocode 1. Actions on structures – Part 1–4. General actions – Wind actions: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. 165 p. (in Ukrainian)
  23. Eremeev, P. G. Current steel constructions of large-span shell of one-off buildings and constructions: Monograph. Moscow: ASV, 2009. 336 p. (in Russian)
  24. Karpilovskii, V. S.; Kriksunov, E. Z.; Maliarenko, A. A.; Perelmuter, A. V. SCAD Office. Computer system SCAD. Moscow: SKAD SOFT, 2009. 647 p. ISBN 978-5-903683-07-9. (in Russian)
  25. Kinash, R. I.; Kopylov, A. E. Aerodynamic researches of fourth globe shaped tanks. In: *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: theory and practice in construction*, 2004, No. 495, pp. 88–92. (in Russian)
  26. Kinash, R. I.; Kopylov, A. E. Research of aerodynamic parameters of two circular cylinders system. In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2007, Issue 2007–6(68), pp. 32–40. (in Russian)
  27. Kirsanov, N. M. Suspended and cable-stayed structures. Moscow: Stroiizdat, 1981. 158 p. (in Russian)
  28. Kirsanov, N. M. Hanging coverage of industrial buildings. Moscow: Stroiizdat, 1990. 128 p. ISBN 5-274-01020-2. (in Russian)
  29. Lessig, E. N.; Lileev, A. F.; Sokolov, A. G. Sheet metal structures. Moscow: Publishing house of references on construction, 1970. 488 p. (in Russian)
  30. Korenev, B. G. (Ed.); Rabinovich, I. M. (Ed.) References on structural dynamics. Moscow: Stroiizdat, 1972. 512 p. (in Russian)
  31. Mahinko, A. V. Probabilistic Design of Communication Tower: Monograph. Poltava: PoltNTU, 2012. 410 p. ISBN 978-966-616-096-9. (in Ukrainian)
  32. Trofimov, V. I. (Ed.); Eremeev, P. G. (Ed.) Membrane structures of buildings and constructions. Reference book in two parts. The second part. Moscow: Stroiizdat, 1990. 198 p. ISBN 5-274-01730-4. (in Russian)
  33. 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. ISBN 5-274-01729-0. (in Russian)
  34. SP 20.13330.2011. Loads and effects. Updated reaction SNiP 2.01.07-85\*. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. 80 p. (in Russian)
  35. Pichugin, S. F.; Mahinko, A. V. Wind loading on constructions. Poltava: ASMI, 2005. 342 p. (in Russian)
  36. Savieikin, G. A. Wind load imposed on constructions. Moscow: Publishing house of references on construction, 1972. 111 p. (in Russian)

33. 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. – ISBN 5-274-01729-0.
34. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* [Текст]. – Введ. 20–05–2011. – М. : Минрегион России, 2011. – 80 с. – (Свод правил).
35. Пичугин, С. Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции [Текст] / С.Ф. Пичугин, А. В. Махинько. – Полтава : АСМІ, 2005. – 342 с.
36. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения [Текст] / Г. А. Савицкий. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1972. – 111 с.
37. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения [Текст] : пер. с англ. / Э. Симиу, Р. Сканлан. – М. : Стройиздат, 1984. – 360 с.
38. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия [Текст]. – Взамен главы СНиП II-6-74 ; введ. 01–01–1987. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с. – (Строительные нормы и правила).
39. СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия [Текст]. – Взамен СНиП II-A.11-62; СН 318-65; СН 355-66 ; введ. 01.09.1974. – М. : Стройиздат, 1976. – 58 с.
40. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика [Текст] : монография / Э. И. Реттер. – М. : Стройиздат, 1984. – 294 с.
41. Типовой проект 704-1-70. Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 20 000 куб. м [Текст]. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара – М. : ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. – 46 с.
42. Про затвердження Зміни № 1 ДБН В.1.2-2:2006 [Текст] : Наказ від 13 серпня 2007 р. № 143 // Інформаційний бюлетень [Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України]. 2007. № 9. С. 31–32.
43. Цепляев, М. Н. Моделирование реальной эпюры ветрового давления на цилиндрический резервуар в среде SCAD [Текст] / М. Н. Цепляев // Металлические конструкции. 2016. Том 22, № 4. С. 83–192.
37. Simiu, E.; Skanlan, R. Wind Effects on Buildings and Structures. Moscow: Stroizdat, 1984. 360 p. (in Russian)
38. SNiP 2.01.07-85\*. Loads and effects. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 44 p. (in Russian)
39. SNiP II-6-74. Loads and effects. Moscow: Stroizdat, 1976. 58 p. (in Russian)
40. Retter, E. I. Architectural and construction aerodynamics: Monograph. Moscow: Stroizdat, 1984. 294 p. (in Russian)
41. Type design 704-1-70. Steel vertical cylindrical tank of 20 000 volume for crude oil and refined products. Album I. Drawing design of tank. Moscow: Research and Development Establishment Projectsteel-constructors of State Committee for Construction of the USSR, 1972. 46 p. (in Russian)
42. According to the change approval No. 1 DBN V.1.2-2:2006: Decree from September, 13th, 2007 number 143. In: *News-bulletin [Ministry of Regional development, constructions and housing and utility services of Ukraine, 2007, No. 9, pp. 31–32. (in Ukrainian)*
43. Tcepliaev, Maxim. Modeling of Real Loading Diagrams of Wind Pressure on Cylindrical Tank using SCAD Software. In: *Metal Constructions, 2016, Volume 22, Number 4, pp. 183–192. (in Russian)*

**Мушанов Владимир Филиппович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе ГОУ ВПО «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 надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Зубенко Анна Васильевна** – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: динамика сооружений, расчет и проектирование пространственных конструкций.

**Дроздов Андрей Александрович** – ассистент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: развитие методики оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования натуральных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

**Мущанов Володимир Пилипович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «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** – ассистент кафедры теоретичної і прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: динаміка споруд, розрахунок і проектування просторових конструкцій.

**Дроздов Андрій Олександрович** – ассистент кафедры металевих конструкцій ДООУ ВПО «Донбаська національна академія 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.

**Mushchanov Volodymyr** – D.Sc. (Engineering), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of 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** – 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.

**Drozдов Andrey** – assistant; Metal Structures and Constructions 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 modeling of full-scale and modeling tests of wind loads on buildings and structures.