



Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru



doi: 10.18720/CUBS.68.4

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^{1*}, А.В. Зубенко², М.Н. Цепляев³

¹⁻³Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка, Украина

V.F. Mushchanov^{1*}, A.V. Zubenko², M.N. Tsepliaev³

¹⁻³Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makiyivka, Ukraine

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

аэродинамическая труба;
вертикальный цилиндрический резервуар;
сферическая кровля;
аэродинамический коэффициент;
напряженно-деформированное состояние;

KEYWORDS

wind tunnel;
vertical cylindrical tank;
globe roof;
aerodynamic factor;
stress-strain state;

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 08.06.2018
Принята: 01.07.2018

ARTICLE HISTORY

Submitted: 08.06.2018
Accepted: 01.07.2018

АННОТАЦИЯ

Вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов эксплуатируются в нефтепарках в составе групп. Для объемов от 10 тыс. м³ и более рекомендуется компоновать резервуары в два ряда. В нормах проектирования даются рекомендации по учету ветровой нагрузки только для отдельно стоящего резервуара. Авторами статьи изучено распределение ветрового потока и его влияние на напряженное состояние сферической кровли стального вертикального цилиндрического резервуара объемом 20 тыс. м³. Рассматривались варианты ветрового давления на один резервуар и на группу резервуаров. Для рассматриваемых вариантов получены аэродинамические коэффициенты в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. Для верификации полученных коэффициентов проводился физический эксперимент на уменьшенной модели резервуара в аэродинамической трубе. Напряжения в элементах сферической кровли резервуара определялись методом конечных элементов при помощи расчетного комплекса SCADOffice. В результате выявлены отличия нормативного распределения ветрового давления от экспериментального для одиночного резервуара и находящегося в группе. Определен наиболее неблагоприятный вариант распределения ветрового давления для резервуара в группе. Проведено сравнение напряженно-деформированного состояния кровли резервуара при нормативной и экспериментальной ветровой нагрузке для наиболее невыгодного варианта.

ABSTRACT

Vertical cylindrical tanks for storing oil and oil products are operated in oil pools as part of groups. For volumes from 10 thousand m³ or more, it is recommended to arrange tanks in two rows. In design standards, recommendations are given to account for wind load only for a stand-alone tank. The authors of the article studied the distribution of the wind flow and its effect on the stressed state of the spherical roof of a steel vertical cylindrical tank with a volume of 20,000 m³. Variants of wind pressure per tank and a group of tanks were considered. For the considered variants, aerodynamic coefficients are obtained in the SolidWorks Flow Simulation software package. To verify the coefficients obtained, a physical experiment was performed on a reduced tank model in a wind tunnel. The stresses in the elements of the spherical roof of the tank were determined by the finite element method using the "SCADOffice" calculation complex. As a result, differences in the standard distribution of wind pressure from the experimental one for a single tank and located in a group were revealed. The most unfavorable version of the distribution of wind pressure for the tank in the group was determined. The stress-strain state of the tank roof is compared with the standard and experimental wind load for the most unfavorable variant.

Содержание

1.	Введение	37
2.	Методы	39
3.	Результаты и обсуждение	39
4.	Заключение	49

1. Введение

Для расчета ветровой нагрузки на сооружения 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.

Существующие 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 [1]. В 1985 г. при выпуске СНиП 2.01.07-85 [2] были упрощены выражения, описывающие динамическую реакцию сооружений при действии ветра [3].

Основные теоретические сведения об архитектурно-строительной аэродинамике, методиках определения ветровой нагрузки на здания и сооружения представлены в работах: Э. Симиу, Р. Сканлан, Э.И. Реттера [4, 5]. Работы Е.В. Горохова, М.А. Березина, [6, 7] посвящены определению ветровых воздействий на здания и сооружения в аэродинамической трубе. В работах Р.И. Кинаша, R.J. Holroyd, M.C. Hort, P.A. MacDonald, Пичугина, Махинько [8-15] описаны экспериментальные моделирования взаимодействия ветрового потока с инженерными сооружениями в аэродинамической трубе. В публикациях С.А. Исаева, Н.И. Ватина, П.А. Баранова [16-18] представлены результаты по верификации и методика компьютерного моделирования влияния ветрового воздействия на высотные здания.

В книгах Е. В. Горохова [6, 19] и П.Г. Еремеева [20] представлены результаты модельных экспериментальных исследований ветровых и снеговых нагрузок на технически сложные большепролетные покрытия со сложной геометрией.

Численному моделированию ветровых воздействий посвящены исследования S. Murakami, A. Moshida, Y. Tominaga, T. Shirasawa [21, 22, 23, 24] и др.

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

В методиках расчета в соответствии с нормативными требованиями [2, 25, 26,] для определения ветровой нагрузки используют графики зависимости значений аэродинамических коэффициентов от положения угла образующей цилиндрической поверхности к направлению ветрового потока. При этом величины этих значений зависят от числа Рейнольдса. Для отечественных норм коэффициенты по высоте резервуара определены при $Re > 4 \cdot 10^5$ [2, 25], а для европейских норм коэффициенты определяются по трем значениям числа Рейнольдса, а именно $Re = 2 \cdot 10^6$, $Re = 10^7$, $Re = 5 \cdot 10^5$ [27]. Для кровли значения коэффициентов не зависят от числа Рейнольдса.

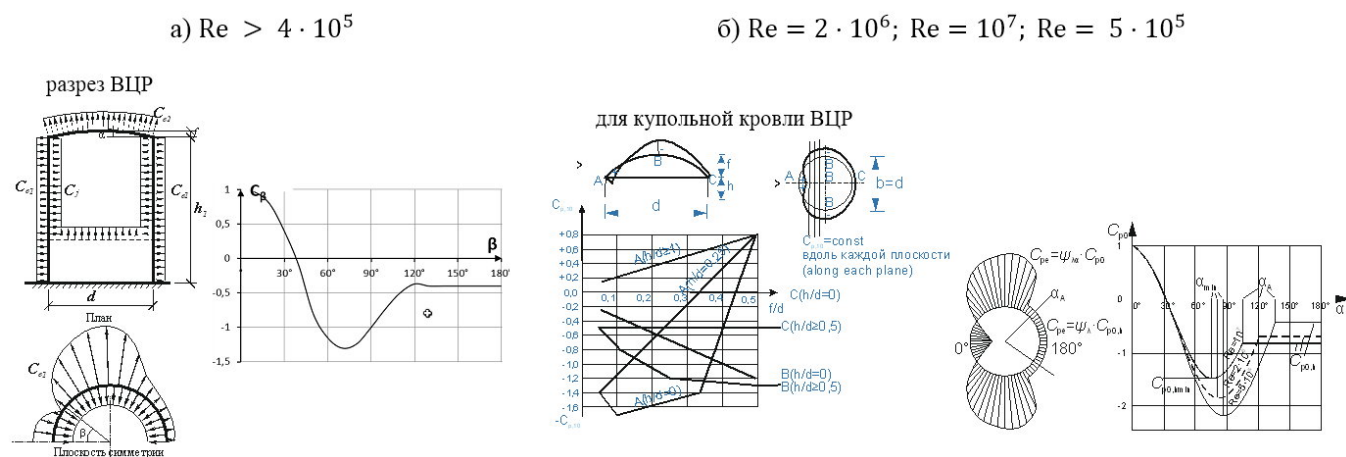


Рисунок 1. Нормирование аэродинамических коэффициентов C_β , определяемые в соответствии с нормативными документами: а) по ДБН В.1.272:2006 [25], б) по EN 1991-1-4:2010 или СП 20.13330.2011 [27, 26], где C_{e1} – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара; C_{e2} – аэродинамический коэффициент для кровли резервуара; C_j – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара применяемый в случае опущенной плавающей кровли, или отсутствия кровли [26]; d – диаметр вертикального цилиндрического резервуара; h_1 – высота резервуара; C_{pe} [26, 27]

По украинским нормам аэродинамический коэффициент для кровли резервуара постоянный и зависит от соотношения стрелы подъема кровли f к диаметру резервуара d [25], по нормам Еврокода определяются три значения А, В, С (Рис. 2). Для рассматриваемого в статье вертикального цилиндрического резервуара соотношение $f/d = 0,45$. Ниже показан аэродинамический коэффициент для кровли резервуара, определенный по ДБН В.1.272:2006 [25] и по EN 1991-1-4:2010 [27].

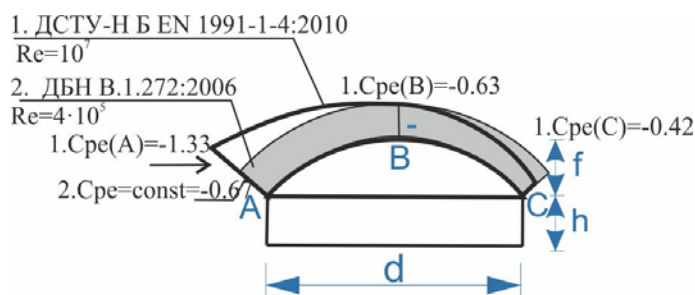


Рисунок 2. Аэродинамический коэффициент для кровли резервуара

Несмотря на многочисленные работы в области проектирования, строительства и эксплуатации резервуаров, ряд вопросов, связанные с оценкой и повышением работоспособности резервуаров, остаются открытыми.

Цель данной работы – изучить нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары для сферической кровли вертикального цилиндрического резервуара в составе группы, потому что для большинства нефтехранилищ такая компоновка является преимущественной.

Поэтому были поставлены задачи:

- выполнить исследование ветровой нагрузки для сферической кровли ВЦР объемом 20 тыс. м³, находящегося в группе из четырех резервуаров, и проанализировать напряженное состояние элементов кровли;
- получить значения аэродинамических коэффициентов для сферической 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 действующими нормативными документами, а именно Еврокод [27];
- на основе полученных результатов в виде коэффициентов ветрового давления на кровлю вертикального цилиндрического резервуара сравнить с экспериментальными данными, приведенными в [28];
- составить конечно-элементную модель в программном комплексе SCAD Office и выполнить анализ напряженного состояния для изолированного резервуара при действии ветровой нагрузки,

определенной по методике Еврокод [27], и нагрузке, полученной в результате численного моделирования в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation;

- при обеспечении допустимой сходимости в пределах 10-15% выполнить расчет для группы из 4-х вертикальных цилиндрических резервуаров, выполнить анализ напряженного состояния элементов кровли для резервуара, на который действует наиболее неблагоприятная нагрузка в группе.

Для решения сформированных выше задач выполнен верификационный расчет для модели ВЦР в программном комплексе SolidWorks Flow Simulations, результаты которого приведены в статье [29].

2. Методы

Основные методы, используемые для решения поставленных задач:

- метод физического моделирования с использованием теории подобия;
- метод конечных объемов в ПК "SolidWorks Simulation" для моделирования обтекания ветровым потоком исследуемого объекта;
- метод конечных элементов в ПК "SCAD Office" для моделирования вертикального цилиндрического резервуара и расчёт конструкций.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик вертикальных цилиндрических резервуаров

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

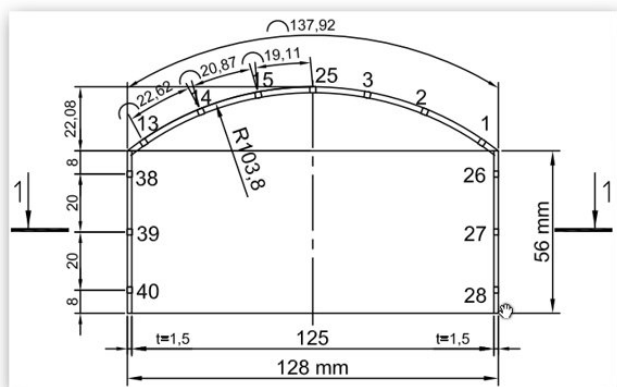
В аэродинамической трубе для модели резервуара с плоской кровлей выполнялся тестовый эксперимент для определения числа Рейнольдса, которое является критерием подобия при проведении аэродинамических экспериментов [29].

Для соблюдения требований соотношения площади проекции экспериментальной модели к площади поперечного сечения рабочей части аэродинамической трубы не должно превышать 3% [30]. Также, учитывая реальные натурные размеры застройки (в соответствии с требованиями ВБН В 2.2-58.2-94 [31, 32], расстояние между резервуарами должно составлять $0,5D$, соответственно при компоновке группы 4-х резервуаров объемом 20 тыс. м³ общая длина составляет 100 м (см. рис. 5) и особенности компоновки рабочей части аэродинамической трубы МАТ-1 ДонНАСА шириною 1 м, был выбран масштаб модели $M = 1:320$.

По плану экспериментальных исследований в аэродинамической трубе МАТ-1 ДонНАСА предусматривалось определение коэффициентов ветрового давления (C_{pi}) в 49 опорных точках на модели резервуара (рис. 3, 4). 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 ($\beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 270^\circ$).

На рисунках 3 и 5 показаны схема и фото физической модели резервуара с выпуклой сферической кровлей, для которой выполнялось исследование.

а) поперечный разрез модели



б) модель в плане

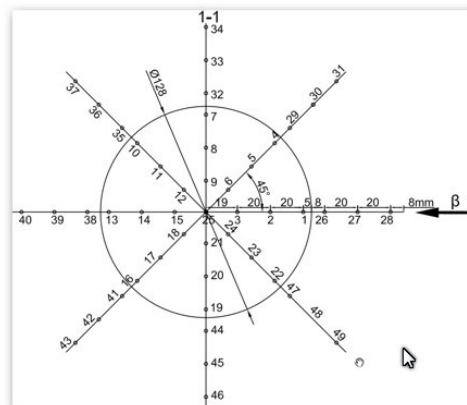


Рисунок 3. Схема исследуемой модели ВЦР с расстановкой опорных точек

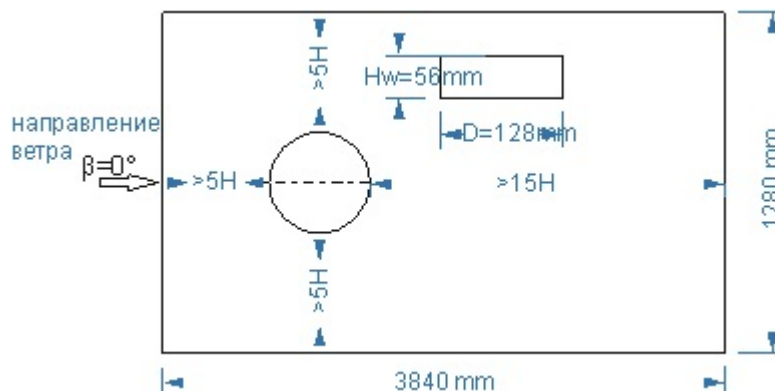


Рисунок 4. Схема модели для численного эксперимента

На рисунке 5 показаны схема с размерами компоновки и установка моделей на поворотном круге с градуировкой.

Каждый цикл экспериментальной продувки (заданный угол атаки, скорость ветрового потока) 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 автоматизированной высокопродуктивной информационно-вычислительной системы «SCADA» [6]. 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.

а) физическая модель с дренажными отверстиями



в) схема расположения модели на поворотном круге в аэродинамической трубе. $D=128\text{ мм}$ – диаметр модели. $0,5D$ – минимальное расстояние при группировании объектов



б) физическая модель с дренажными отверстиями в группе



Рисунок 5. Компоновка группы вертикальных цилиндрических резервуаров

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 кровли резервуара (сравнение результатов экспериментальных данных и численного исследований обеспечивают сходимость в пределах 15 % для основных расчетных сечений).

3.2. 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 [21-24], 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 $24,89 \text{ м} \approx 25 \text{ м}$ процент 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.

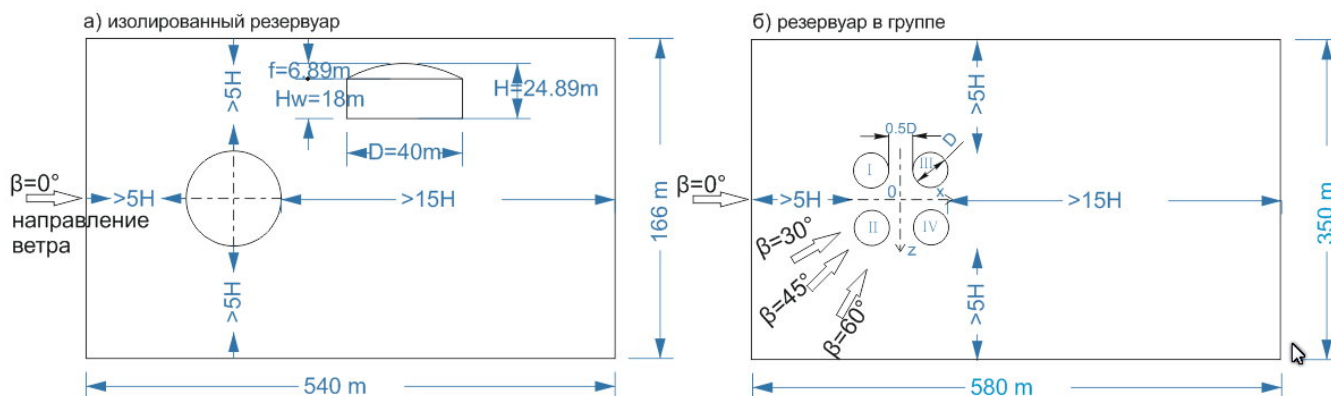


Рисунок 6. Размер расчётной области для изолированного резервуара, и в группе из 4-х объектов.

3.3. 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) [33], по нормам Еврокода, т.к. для норм Украины [25] и РФ [26] энергия пульсаций скорости описывается спектром Давенпорта, который не учитывает зависимость энергии турбулентных пульсаций ветра от высоты, и интегральный продольный масштаб турбулентности принимает постоянное значение $L_u(z) = 1200 \text{ м}$, интенсивность турбулентность в явном виде не фигурирует.

При назначении размера сетки конечного объема для решения CFD задачи руководствовались рекомендациями А. Moshida, Y. Tominaga [22] из Японского Института Архитектуры. А именно разрешение 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 [30].

Для определения размера сетки в области CFD был проведен верификационный расчет в трехмерной постановке для экспериментальной модели (см. рис. 3) для значений числа Рейнольдса, полученного при продувке модели в аэродинамической трубе.

3.4. Результаты эксперимента

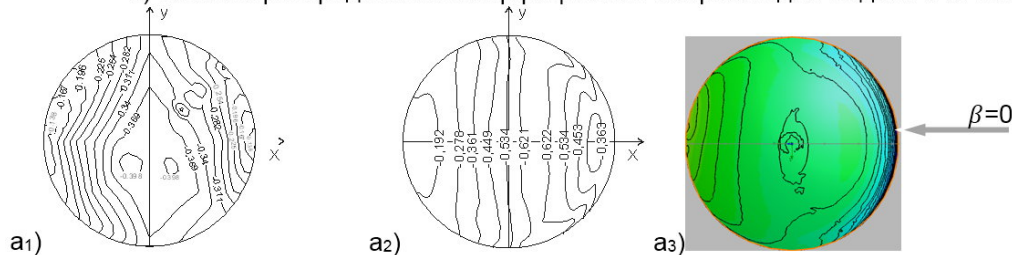
Представлены результаты, полученные при проведении физического эксперимента в аэродинамической трубе и численного исследования в программе SolidWorks Flow Simulation по распределению по кровле модели ВЦР аэродинамических коэффициентов для одного ВЦР со сферической выпуклой кровлей (Рис. 7) и состоящего в группе из 4-х объектов (Рис. 8).

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

Для резервуара, находящегося в группе, анализируя полученные аэродинамические коэффициенты, можно сказать, что наиболее неблагоприятным является воздействие ветрового потока при угле атаки 45° для резервуара под номер II (рис. 6).

Выпуклая сферическая кровля ($Re = 1,16E + 05$) для изолированного ВЦР

а) изополя распределения коэффициентов по кровле для модели в М 1:320



б) Профиль распределения коэффициентов по кровле

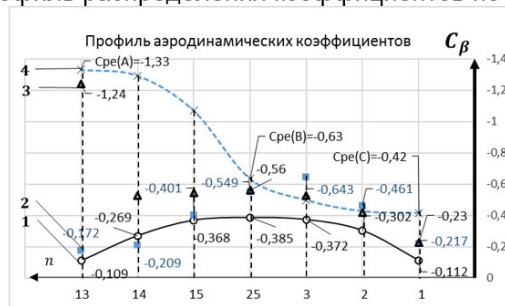
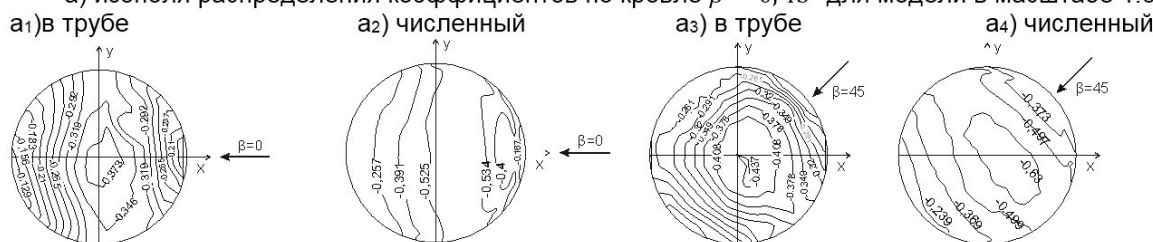


Рисунок 7. Сопоставление распределения аэродинамических коэффициентов для изолированного резервуара с выпуклой сферической кровлей (угол атаки ветрового потока $\beta = 0^\circ$),

Выпуклая сферическая кровля ($Re = 1,16E + 05$) для ВЦР в группе

а) изополя распределения коэффициентов по кровле $\beta = 0, 45^\circ$ для модели в масштабе 1:320



б) Профиль распределения коэффициентов по кровле $\beta = 0, 45^\circ$

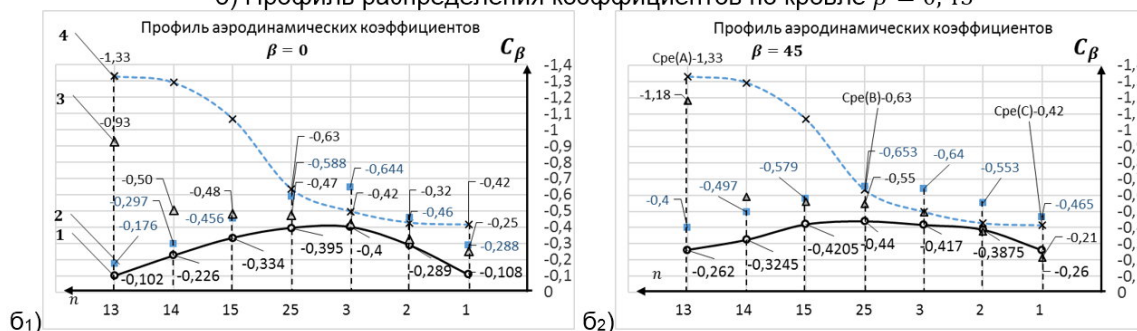


Рисунок 8. Сопоставление распределения аэродинамических коэффициентов по кровле резервуара в группе с выпуклой кровлей,

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 SolidWorks Flow Simulation;
 3 – значения для модели в М 1:1, полученные при численном моделировании в SolidWorks Flow Simulation;
 4 – значения по EN 1991-1-4:2005 [27];
 n - номера точек в которых проводилось измерение давления (Рис. 3)

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 А, В, С, для которых даны рекомендации по определению коэффициентов по нормативным документам, а именно Еврокод (EN 1991-1-4:2010 [27]), расхождение со значениями численного эксперимента составляет 6-12%, 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 расчётной области и размеры сетки приняты верно и могут быть приняты для последующих исследований группы резервуаров с другими типоразмерами.

3.5. Моделирование конечно-элементной модели резервуара в программном комплексе SCAD Office

Значения ветрового давления на одиночный резервуар и резервуары в группе определяются с помощью программного комплекса SolidWorks Flow. Для оценки НДС резервуара наиболее целесообразно применять метод конечных элементов. Поскольку проектировщик зачастую ограничен в использовании той или иной расчетной программы, в данной статье рассматривается задание реальной эпюры ветрового давления в достаточно распространённом на территории стран СНГ программном комплексе SCAD office.

В данной статье рассмотрим распределение ветрового давления на кровлю ВЦР в таких вариантах:

- реальная эпюра ветрового давления по нормам Европейского Союза [27];
- ветровая нагрузка на одиночный резервуар и на резервуары, находящиеся в группе, по результатам численного моделирования.

3.6. Параметры конечно-элементной модели резервуара

В статье рассматривается ветровая нагрузка на резервуар объёмом 20 тыс. м³ согласно типовому проекту № 704-1-70 [34]. Для получения адекватной картины распределения напряжений в кровле резервуара необходимо учитывать совместную работу стенки и кровли резервуара. Следовательно, в программе SCAD была создана конечно элементная модель резервуара, включающая в себя все конструктивные элементы резервуара. В модели приняты следующие особенности:

- днище жестко зашпунтовано по всей площади;
- стенка резервуара закреплена шарнирно к днищу;
- опорное кольцо кровли задано параметрически в виде стержня с вычисленными характеристиками;
- элементы ребристо-кольцевого купола также заданы стержнями;
- толщины поясов стенки, днища и окрайки заданы согласно типовому проекту [34].

Размер конечного элемента стенки принят 250x250 мм. При дальнейшем уменьшении размера конечного элемента (КЭ), точность повышается незначительно, при этом значительно возрастает трудоемкость расчета и задания нагрузок.

В расчетном комплексе SCAD отсутствует возможность задания нелинейно изменяющейся нагрузки на криволинейную поверхность по известному множеству значений нагрузки для конкретных точек. Это означает, что для задания ветровой нагрузки на криволинейную поверхность резервуара придется вручную просчитывать и задавать нагрузку отдельно на каждый конечный элемент. Поскольку, модель резервуара состоит из более чем 96000 КЭ, процедура задания ветровой нагрузки может занять несколько дней и более. В качестве альтернативы можно использовать метод задания нагрузки через текстовый файл. Методика задания реальной эпюры ветрового давления на аналогичный резервуар приводится в работе [35], поэтому в данной статье будут использованы выдержки из указанной работы, и процесс будет описан менее подробно.

3.7. Определение расчетной нагрузки по результатам численного моделирования

Эпюры ветрового давления на одиночный резервуар и резервуар в группе, полученные с помощью программного комплекса SolidWorks Flow имеют сложную форму. Для переноса данной нагрузки на каждый КЭ была сформирована таблица значений нагрузки на кровлю и стенку ВЦР в зависимости от расположения расчетной точки по высоте и длине окружности. Шаг по высоте принят равным 1 м, по длине окружности 2° (0,696 м). Промежуточные значения определяются двойной линейной интерполяцией в MS Office Excel при помощи макросов. Пример сформированной таблицы для одиночного резервуара приведен ниже (таблица 1).

Таблица 1. Значения ветрового давления на кровлю одиночного резервуара, Па

		Высота расчетной точки, м			
		15	16	17	17,9
Шаг по долине окружности 2° =0,696 м	0	-669	-649	-577	-580
	0.696	-636	-649	-574	-580
	1.392	-561	-651	-571	-580
	...	...	...	...	...
	123.17	-742	-649	-555	-573
	123.86	-795	-641	-551	-573
	124.56	-895	-642	-548	-572
	125.35	-815	-651	-542	-572

Аналогичные таблицы были составлены для каждого из 4-х резервуаров в группе при различных углах атаки. По результатам сравнения полученных таблиц для дальнейшего анализа НДС резервуаров в группе был выбран ВЦР №2 (рис. 6) при угле атаки 45 градусов. При таком угле на кровлю ВЦР №2 действует наиболее отличающаяся эпюра ветрового давления, от эпюры действующей на одиноко стоящий резервуар (Рис. 9).

Далее в MS Office Excel создаются три таблицы для определения ветрового давления на каждый конечный элемент, для последующего задания в SCAD:

- ветровая нагрузка на одиночный резервуар согласно Еврокода [27];
- ветровая нагрузка на одиночный резервуар по значениям, полученным в SolidWorks Flow;
- ветровая нагрузка на резервуар №2 в группе (угол атаки 45°) по значениям, полученным в SolidWorks Flow.

Поскольку принцип создания таких таблиц абсолютно одинаковый, ниже будет приведен пример фрагмента таблицы для одного из случаев – ветровой нагрузки на одиночный резервуар значениям, полученным в SolidWorks Flow (таблица 2).

Таблица 2. Определение ветрового напора на каждый КЭ кровли одиночного ВЦР

№ эл-та	z, м	Длина дуги, м	We, кН/м ²	Тип нагрузки	Направление		Значение нагрузки: № элемента		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,25	0.125	-2,2	6	3		-2,2:54260		/
2	0,25	0.376	-2,164	6	3		-2,164:54261		/
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
42078	17.88	125.29	-1,98	6	3		-1,98:96338		/
42079	17.88	125.54	-1,989	6	3		-1,989:96339		/

Комментарии к таблице:

столбец 3 – длина дуги от 1-го КЭ до расчетного по длине окружности, м;

столбец 4 – значение ветрового давления, определяется двойной интерполяцией по таблице 2 в MS Office Excel;

столбцы 5-10 – элементы кода, которые будут задаваться в SCAD.

3.8. Задание нагрузки через текстовый файл

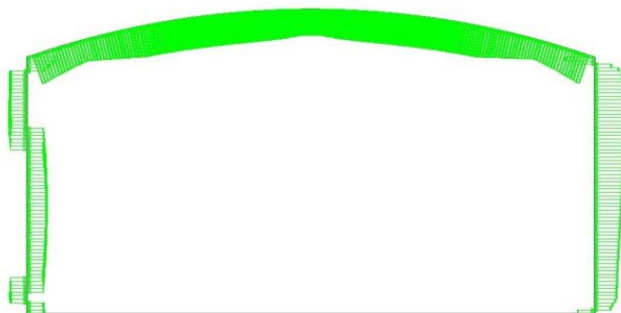
Алгоритм задания ветровой нагрузки через текстовый файл подробно описан в работе [35]. Суть метода состоит в редактировании файла модели резервуара созданной в SCAD, и сохраненного в виде текста. В текстовом файле вручную вводится наименование нагрузки и копируются параметры и значения нагрузки на каждый элемент. Так для ветровой нагрузки на одиночный резервуар это будут столбцы 5-10 и строки 1-42079 таблицы 2. Для отображения результатов задания реальной эпюры ветрового давления ниже приведены два характерных разреза - поперек (на половине высоты стенки) и вдоль, для всех 3-х рассматриваемых расчетных схем (рисунки 9-11):



а) продольный разрез по высоте РВС



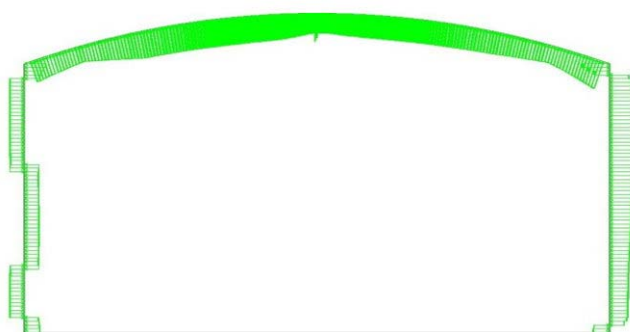
б) поперечный разрез по высоте РВС

Рисунок 9. Ветровая нагрузка в программе SCAD – ветровая нагрузка по Еврокоду

а) продольный разрез по высоте РВС



б) поперечный разрез по высоте РВС

Рисунок 10. Ветровая нагрузка в программе SCAD – экспериментальная ветровая нагрузка на одиночный резервуар

а) продольный разрез по высоте РВС



б) поперечный разрез по высоте РВС

Рисунок 11. Ветровая нагрузка в программе SCAD – экспериментальная ветровая нагрузка на резервуар №2 в группе (ветер 45°)

Далее выполнен анализ НДС кровли резервуаров для всех трёх рассматриваемых вариантов.

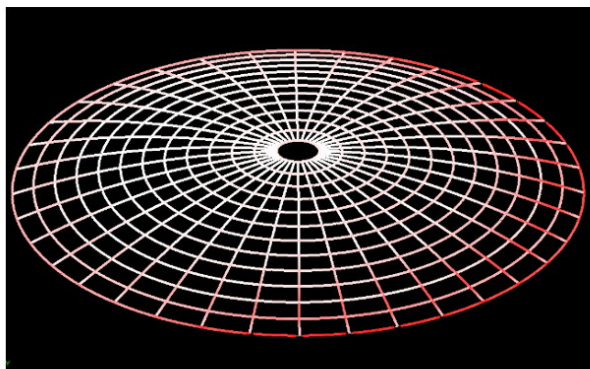
3.9. Конечно-элементный анализ НДС кровли при действии ветровой нагрузки на изолированный ВЦР по рекомендациям Еврокода и нагрузки, полученной по результатам численного моделирования

Основным несущим элементом кровли является ребристо-кольцевой купол. Ветровая нагрузка передается на него через стальную обшивку кровли. Следовательно, для оценки НДС кровли целесообразно оценить напряжения, возникающие в радиальных и кольцевых ребрах кровли резервуаров.

Было использовано сочетание ветровой нагрузки и собственного веса с коэффициентами сочетания равными единице (1 x Ветер + 1 x Собственный вес).

Для общего представления о НДС кровли ВЦР от названных нагрузок ниже приведено распределение эквивалентных напряжений в ребристо-кольцевом куполе резервуара по 4-й теории прочности (рисунки 12, 13):

а) распределение напряжений



б) значения напряжений

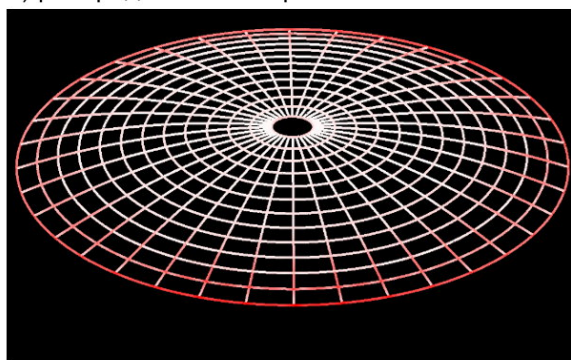
	σ_{E4}		
	Н/м ²	Н/м ²	
☒	39037.383	912475.125	14440
☒	912475.125	7463063.5	72163
☒	7463063.5	14013652	13786
☒	14013652	20564242	2786
☒	20564242	27114830	884
☒	27114830	33665420	320
☒	33665420	40216008	26

☒ Шкала фрагмента

Заккрыть

Рисунок 12. Эквивалентные напряжения по 4-й теории прочности в каркасе кровли резервуара от ветровой нагрузки, рассчитанной по Еврокоду

а) распределение напряжений



б) значения напряжений

	σ_{E4}		
	Н/м ²	Н/м ²	
☒	433159.719	595241.875	9475
☒	595241.875	11248902	80501
☒	11248902	21902562	10583
☒	21902562	32556224	2460
☒	32556224	43209880	873
☒	43209880	53863540	153

☒ Шкала фрагмента

Заккрыть

Рисунок 13. Эквивалентные напряжения по 4-й теории прочности в каркасе кровли одиночного резервуара от ветровой нагрузки, полученной в SolidWorks Flow

Согласно типовому проекту [34] ребристо-кольцевой купол состоит из 36 радиальных и 12 кольцевых ребер. Для сравнения НДС кровли резервуара под действием различной ветровой нагрузки были выбраны, указанные на рис. 14, ребра.

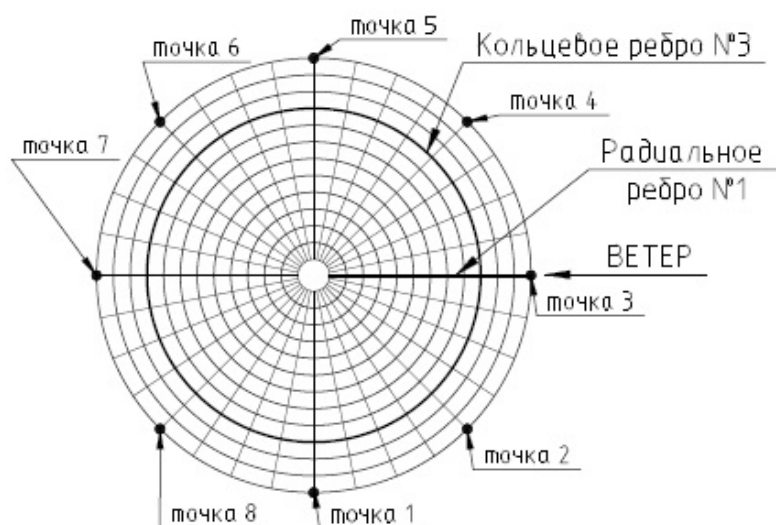


Рисунок 14. Ребристо-кольцевой купол – рассматриваемые ребра

Эпюра эквивалентных напряжений для рассматриваемых случаев не имеет значительных отличий. Для радиального ребра эпюры приведены на рисунках 15-16.

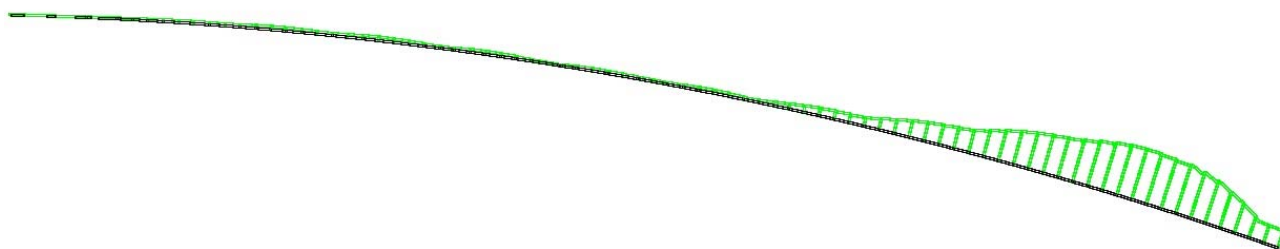


Рисунок 15. Эпюра напряжений по 4-й теории прочности в радиальном ребер от ветровой нагрузки рассчитанной по Еврокоду

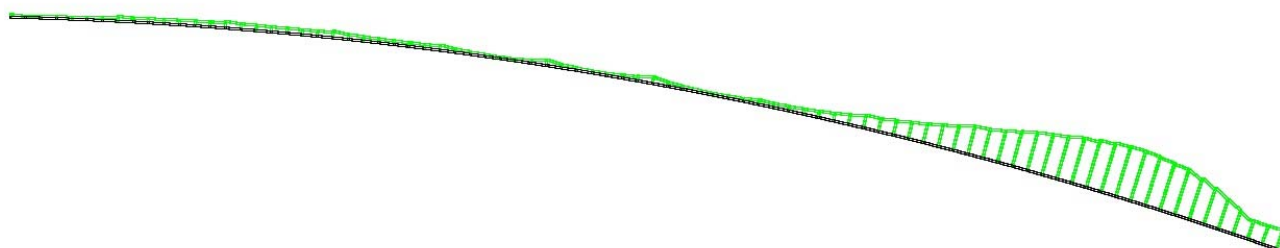


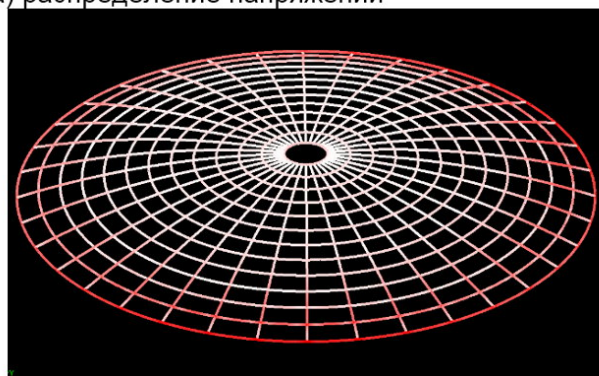
Рисунок 16. Эпюра напряжений по 4-й теории прочности в радиальном ребер от ветровой нагрузки, полученной в SolidWorks Flow

В целом, можно сказать, что возникающие напряжения от ветровой нагрузки по Еврокоду и по результатам численного моделирования отличаются незначительно. По полученным значениям напряжений были составлены сравнительные таблицы для характерных точек, результаты численного сравнения предложены в разделе «Выводы».

3.10. Конечно элементный анализ напряженно-деформированного состояния кровли при действии неблагоприятной ветровой нагрузки на ВЦР, состоящий в группе из четырех объектов.

Как отмечалось ранее, будет рассмотрен случай ВЦР №2 при угле атаки ветра 45°. В целом распределение эквивалентных напряжений в ребристо-кольцевом куполе кровли резервуара по 4-й теории прочности представлено на рис. 17.

а) распределение напряжений



б) значения напряжений

σ_{eq}			
	H/M^2	H/M^2	
☒	311382	527509.625	11315
☒	527509.625	9231419	73621
☒	9231419	17935328	16817
☒	17935328	26639238	2943
☒	26639238	35343144	1196
☒	35343144	44047056	393
☒	44047056	52750964	36

☒ Шкала фрагмента  

Заккрыть

Рисунок 17. Эквивалентные напряжения по 4-й теории прочности в каркасе кровли резервуара, расположенного в группе, от нагрузки, полученной в SolidWorks Flow

Также как и в п.2, для сравнения НДС кровли резервуара под действием различной ветровой нагрузки были выбраны, указанные на рис. 14, ребра.

Эпюра эквивалентных напряжений в радиальном ребре для случая ветровой нагрузки на резервуар в группе приведена на рис. 18.

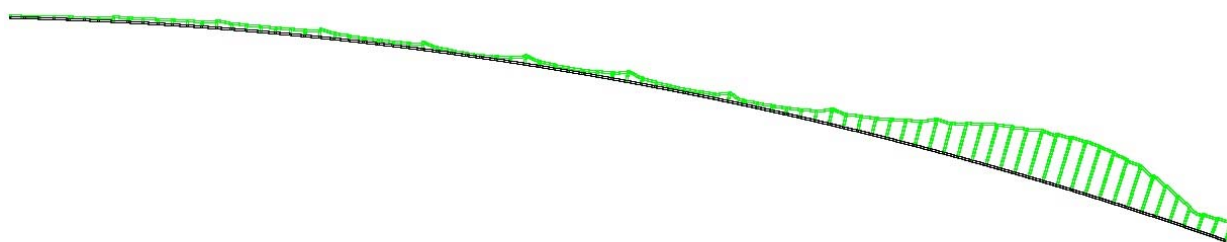


Рисунок 18. Эпюра напряжений по 4-й теории прочности в радиальном ребре кровли ВЦР, находящегося в группе

Как и в двух других рассматриваемых случаях эпюра эквивалентных напряжений не имеет принципиальных отличий по форме. Далее в рассматриваемых ребрах были выделены по восемь характерных точек. Для кольцевого ребра эти точки обозначены на рисунке 14, для радиального ребра эти точки расположены с равным шагом начиная с места стыка с опорным кольцом.

В кольцевом элементе ребристо-кольцевого купола кровли ВЦР эквивалентные напряжения в характерных точках в зависимости от ветровой нагрузки распределились следующим образом (рис. 19):

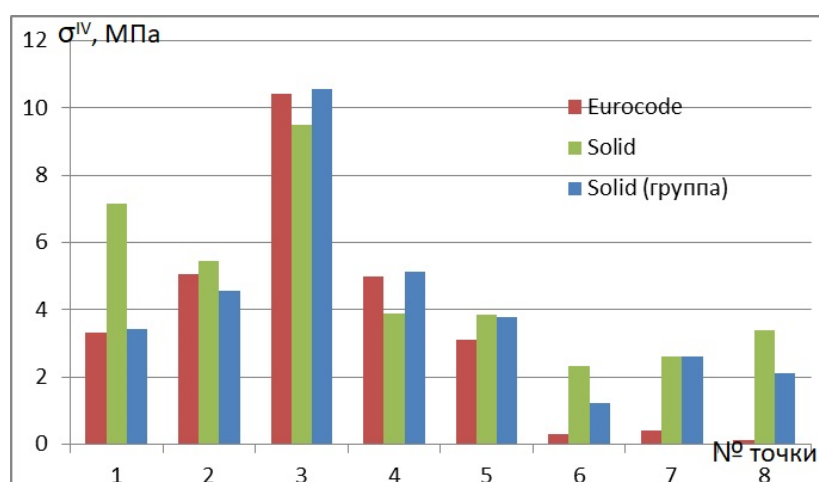


Рисунок 19. Эквивалентные напряжения в кольцевом ребре кровли для различной ветровой нагрузки

Таким образом, в кольцевом элементе пиковые значения эквивалентных напряжений во всех трех случаях отличаются не более чем на 6%. Максимальные значения напряжений возникают при расположении резервуара в группе.

В радиальном ребре ребристо-кольцевого купола кровли ВЦР эквивалентные напряжения в характерных точках в зависимости от ветровой нагрузки распределились следующим образом (рис. 20).

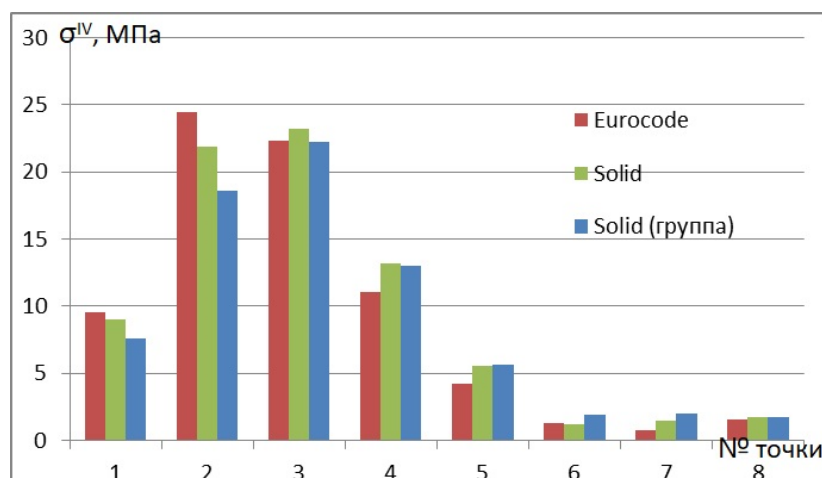


Рисунок 20. Эквивалентные напряжения в радиальном ребре кровли для различной ветровой нагрузки

Таким образом, в радиальном ребре пиковые значения эквивалентных напряжений в одиночном резервуаре (согласно нагрузке из SolidWorks Flow) меньше на 18%, чем возникающие по Еврокоду. Пиковые значения эквивалентных напряжений (согласно нагрузке из SolidWorks Flow) для резервуара в группе меньше на 25%, чем возникающие по Еврокоду.

4. Заключение

На основании выполненных экспериментальных и численных исследований напряженного состояния элементов конструкции сферической кровли отдельно стоящего вертикального цилиндрического резервуара и группы из 4-х резервуаров под действием ветровой нагрузки установлено, что:

- 1) для реализации в среде SolidWorks Flow Simulation, предназначенной для численного моделирования аэродинамических процессов, предложен методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком кровли резервуара, отличительной особенностью которого стало определение размера области компьютерного моделирования. Расхождение результатов экспериментальных и численных исследований не превышает 15% для основных расчетных сечений.
- 2) для случая, который не регламентируется нормативными документами по нормированию ветровой нагрузки на конструкции резервуаров (для резервуара, находящегося в группе из 4-х резервуаров), наиболее неблагоприятным является воздействие ветрового потока при угле атаки 45° на резервуар, расположенный с «наветренной» стороны (резервуар номер II на рис. 6);
- 3) по результатам конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния в программном комплексе SCAD Office сферической кровли изолированного резервуара под действием ветровой нагрузки, сформированной как по требованиям Еврокода, так и по результатам численного моделирования в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation, величины напряжений в элементах каркаса отличаются незначительно (в пределах 15...20%). Имеющиеся большие расхождения зафиксированы лишь в зонах малыми величинами напряжений, что не является определяющим при проведении прочностных расчетов;
- 4) напряжения в каркасе сферической кровли резервуара, находящегося в составе группы, вычисленные от действия ветровой нагрузки, в пределах 6...25% отличаются от напряжений, вычисляемых в соответствии с методиками, регламентированными Еврокод. При этом, для резервуара, находящегося в группе, максимальные расчетные напряжения, вычисленные от уточненных значений ветровой нагрузки, меньше, чем вычисленные по нормам Еврокод для одиночного резервуара. Для кольцевых элементов наблюдается обратная картина. Данный факт свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования нормативных документов в части нормирования ветровой нагрузки для оценки напряженного состояния конструкций резервуаров, эксплуатируемых в составе группы.

Литература

- [1]. СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия. М.: Стройиздат, 1976. 58 с.
- [2]. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 44 с.
- [3]. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Изво лит. по стр-ву, 1972. 111 с.
- [4]. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
- [5]. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М.: Стройиздат, 1984. 294 с.
- [6]. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 169 с.
- [7]. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Олденполиграфия, 2003. 140 с.
- [8]. Кинаш Р.И., Копылов А.Е. Аэродинамические исследования четырех круглых цилиндров // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2004. № 495. С. 88–92.
- [9]. Кинаш Р.И., Копылов А.Е. Исследование аэродинамических параметров системы из двух круговых цилиндров // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2007. Вып. 2007-6(68). С. 32–40.
- [10]. Holroyd R.J. On the behaviour of open-topped oil storage

References

- [1]. Construction norms and regulations SNiP II-6-74. Nagruzki i vozdeystviya [SNiP II-6-74. Loads and effects]. Moscow : Stroyizdat, 1976. 58 p. (rus)
- [2]. Construction norms and regulations SNiP 2.01.07-85*. Nagruzki i vozdeystviya [SNiP 2.01.07-85*. Loads and effects]. Moscow : FGUP TsPP, 2005. 44 p. (rus)
- [3]. Savitskiy G. A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load imposed on constructions]. Moscow : Publishing house of references on construction, 1972. 111 p. (rus)
- [4]. Simiu E., Skanlan R. Vozdeystviye vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind Effects on Buildings and Structures]. Moscow : Stroyizdat, 1984. 360 p. (rus)
- [5]. Retter E. I. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural and construction aerodynamics]. Moscow : Stroyizdat, 1984. 294 p. (rus)
- [6]. Gorokhov Ye. V., Kuznetsov S. G. Eksperimentalnye metody opredeleniya vetrovykh nagruzok na zdaniya i sooruzheniya [Experimental methods of determination of wind load on buildings and constructions]. Donetsk : Nord-Press, 2009. 169 p. (rus)
- [7]. Berezin M. A., Katyushin V. V. Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik stroitel'nykh konstruksiy [Aerodynamic characteristics atlas of engineering constructions]. Novosibirsk : Oldenpoligrafiya, 2003. 140 p. (rus)
- [8]. Kinash R. I.; Kopylov A. Ye. Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Theory and Practice in Construction. 2004. No. 495. Pp. 88–92. (rus)
- [9]. Kinash R. I., Kopylov A. Ye. Proceeding of the Donbas National

- tanks in high winds (Part 1) // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1983. 12. P. 329–352.
- [11]. Hort M.C., Robbins A.G. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002. Vol. 90. P. 1321–1348.
- [12]. 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 // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1988. 31. P. 165–187.
- [13]. MacDonald P.A., Kwok K.C.S., Holmes J.D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990. 34. P. 77–95.
- [14]. Пичугин С.Ф., Махінко А.В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. Полтава: АСМІ, 2005. 342 с.
- [15]. Махінко А.В. Ймовірнісний розрахунок баштових опор зв'язку. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 410 с.
- [16]. Isaev S.A., Vatin N.I., Baranov P.A., Sudakov A.G., Usachov A.Ye., Yegorov V.V. Development and verification of multiblock computational technologies for solution of unsteady problems of high building aerodynamics in the framework of URANS approach // *Magazine of Civil Engineering*. 2013. 36 (1). P. 103–109.
- [17]. Isaev S.A., Baranov P.A., Vatin N.I., Zhukova Y.V., Sudakov A.G. Suppression of the Karman vortex street and reduction in the frontal drag of a circular cylinder with two vortex cells // *Technical Physics Letters*. 2014. 40 (8). P. 653–656.
- [18]. Isaev S.A., Vatin N.I., Lebega V.A., Zinoviev V.N., Chang K.-C., Miao J.-J. Problems and methods of numerical and experimental investigation of high rise constructions' aerodynamics in the coastal region "sea-land" // *Magazine of Civil Engineering*. 2013. 37 (2). P. 54–61+118–120.
- [19]. Горохов Е.В., Мушчанов В.Ф., Кинаш Р.И., Шимановский А.В., Лебедич И.Н. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов. Макеевка: РИО ДонНАСА, 2008. 405 с.
- [20]. Еремеев П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М.: АСВ, 2009. 336 с.
- [21]. Murakami S. Computational wind engineering // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990. Volume 36, Part 1. P. 517–538.
- [22]. Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. Comparison of various k-ε models and DSM applied to flow around a high-rise building — Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment // *Wind Struct.* 2002. 5 (2–4). P. 227–244.
- [23]. Tominaga Yoshihide, Mochida Akashi, Shirasawa Taichi, Yoshie Ryuichiro, Kataoka Hiroto, Harimoto Kazuyoshi, Nozu Tsuyoshi. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2004. Vol. 3. P. 63–70.
- [24]. Shirasawa Taichi, Tominaga Yoshihide, Yoshie Ryuichiro, Mochida Akashi, Yoshino Hiroshi, Kataoka Hiroto, Nozu Tsuyoshi. Development of CFD Method for Predicting Wind Environment around a High-Rise Building: Part 2: The cross comparison of CFD results using various k-ε models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape (Environmental Engineering) // *Journal of Technology and Design, AIJ*. 2003. No. 18. P. 169–174.
- [25]. ДБН В.1.2-2:2006. Державні будівельні норми. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. К.: Мінбуд України, 2006. 61 с.
- [26]. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: Госстандарт, 2011. 80 с.
- [27]. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження (EN 1991-1-4:2005, IDT). К.: Мінеріон України, 2013. 165 с.
- [28]. Mushchanov Volodymyr, Zubenko Ganna, Moskalenko Ivan. Numerical simulation of wind pressure on a vertical Academy of Civil Engineering and Architecture. 2007. Issue 6(68). Pp. 32–40. (rus)
- [10]. Holroyd R. J. On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds (Part 1). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1983. No. 12. Pp. 329–352.
- [11]. Hort M. C., Robbins A. G. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002. Vol. 90. Pp. 1321–1348.
- [12]. 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. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1988. No. 31. Pp. 165–187.
- [13]. MacDonald P. A., Kwok K. C. S., Holmes J. D. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990. No. 34. Pp. 77–95.
- [14]. Pichugin S. F., Makhinko A. V. Vetrovaya nagruzka na stroitelnyye konstruktsiyi [Wind loading on constructions. Poltava: ASMI, 2005. 342 p. (rus)]
- [15]. Makhinko A. V. Probabilistic Design of Communication Tower. Poltava: PolNTU, 2012. 410 p. (ukr)
- [16]. Isaev, S.A., Vatin, N.I., Baranov, P.A., Sudakov, A.G., Usachov, A.Ye., Yegorov, V.V. Development and verification of multiblock computational technologies for solution of unsteady problems of high building aerodynamics in the framework of URANS approach (2013) *Magazine of Civil Engineering*, 36 (1), pp. 103–109.
- [17]. Isaev, S.A., Baranov, P.A., Vatin, N.I., Zhukova, Y.V., Sudakov, A.G. Suppression of the Karman vortex street and reduction in the frontal drag of a circular cylinder with two vortex cells (2014) *Technical Physics Letters*, 40 (8), pp. 653–656.
- [18]. Isaev, S.A., Vatin, N.I., Lebega, V.A., Zinoviev, V.N., Chang, K.-C., Miao, J.-J. Problems and methods of numerical and experimental investigation of high rise constructions' aerodynamics in the coastal region "sea-land" (2013) *Magazine of Civil Engineering*, 37 (2), pp. 54–61+118–120.
- [19]. Gorokhov Ye. V., Mushchanov V. F., Kinash R. I., Shimanovskiy A. V., Lebedich I. N. Konstruktsiyi statsionarnykh pokrytiy nad tribunami stadionov [Construction of fixed-site coverings over terraces]. Makeyevka : RIO DonNASEA, 2008. 405 p. (rus)
- [20]. Yermeyev, P. G. Sovremennye stalnye konstruktsiyi bolsheproletnykh pokrytiy unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [Current steel constructions of large-span shell of one-off buildings and constructions]. Moscow : ASV, 2009. 336 p. (rus)
- [21]. Murakami S. Computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990. Volume 36, Part 1. Pp. 517–538.
- [22]. Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. Comparison of various k-ε models and DSM applied to flow around a high-rise building — Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. *Wind Struct.* 2002. No. 5 (2–4). Pp. 227–244.
- [23]. Tominaga Yoshihide, Mochida Akashi, Shirasawa Taichi, Yoshie Ryuichiro, Kataoka Hiroto, Harimoto6 Kazuyoshi, Nozu Tsuyoshi. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2004. Vol. 3. Pp. 63–70.
- [24]. Shirasawa Taichi, Tominaga Yoshihide, Yoshie Ryuichiro, Mochida Akashi, Yoshino Hiroshi, Kataoka Hiroto, Nozu Tsuyoshi. Development of CFD Method for Predicting Wind Environment around a High-Rise Building : Part 2 : The cross comparison of CFD results using various k-ε models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape (Environmental Engineering). *AIJ Journal of Technology and Design*. 2003. Volume 9, Issue 18. Pp. 169–174.
- [25]. DBN V.1.2-2:2006. Derzhavni budivelni normy. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivelnikh obyektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya [National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2006. 61 p. (ukr)
- [26]. Sey of Rules SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* [Loads and effects. Updated reaction. SNiP 2.01.07-85*]. Moscow : Ministry of

- cylindrical tank surface // Металлические конструкции. 2013. Том 19, № 3. С. 173–181.
- [29]. Зубенко А.В., Дроздов А.А. Модельные испытания вертикальных цилиндрических резервуаров и верификация численных исследований // Металлические конструкции. 2016. Том 22, № 2. С. 91–97.
- [30]. Franke J., Hirsch C., Jensen A.G., Krüs H.W., Schatzmann, Westbury P.S., Miles S.D., Wisse J.A., Wright N.G. Recommendations on the Use of CFD in Wind Engineering // 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. Rhode-Saint-Genèse: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2004. P. 1.1–1.11.
- [31]. ВБН В 2.2-58.1-94. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Київ: Державний Комітет України по нафти і газу, 1994. 150 с.
- [32]. ВБН В 2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Київ: Держкомнафтогаз, 1994. 95 с.
- [33]. Степанов Р.Н., Роменский Д.И., Мушанов В.Ф., Зубенко А.В., Цепляев М.Н. Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар // Наукоедение: Интернет-журнал. 2017. Том 9, № 6. <https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf>.
- [34]. Типовой проект 704-1-70. Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 20000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. М.: ЦНИИПроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. 46 с.
- [35]. Цепляев М.Н. Моделирование реальной эпюры ветрового давления на цилиндрический резервуар в среде SCAD // Металлические конструкции. 2016. Том 22, № 4. С. 83–192.
- Regional Development of Russia, 2011. 80 p. (rus)
- [27]. DSTU-N B EN 1991-1-4:2010. Yevrokod 1. Dii na konstruktzii. Chastyna 1-4. Zagalni dii. Vitrovi navantazhennyya (EN 1991-1-4:2005, IDT) [Eurocode 1. Actions on structures – Part 1-4. General actions – Wind actions (EN 1991-1-4:2005, IDT)]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. 165 p. (ukr)
- [28]. Mushchanov Volodymyr, Zubenko Ganna, Moskalenko Ivan. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface. Metal Constructions. 2013. Vol. 19, No. 3. Pp. 173–181.
- [29]. Zubenko Hanna, Drozdov Andrey. Metal Constructions. 2016. Vol. 22, No. 2. Pp. 91–97. (rus)
- [30]. Franke J., Hirsch C., Jensen A. G., Krüs H. W., Schatzmann M., Westbury P. S., Miles S. D., Wisse J. A., Wright N. G. Recommendations on the Use of CFD in Wind Engineering. 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. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2004. Pp. 1.1-1.11.
- [31]. VBN V 2.2-58.1-94. Proektuvannya skladiv nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa [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. (ukr)
- [32]. VBN V 2.2-58.294. Rezervuary vertykalni stalevi dlya zberigannya nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa [Vertical steel tanks, holding oil and oil-products, having vapour pressure not above 93,3 kPa]. Kyiv : Derzhkomnaftogaz, 1994. 95 p. (ukr)
- [33]. Stepanov R. N., Romenskiy D. I., Mushchanov V. F., Zubenko A.V., Tsepliaev M. N. Naukovedenie. 2017. Volume 9, Number 6. (rus)
- [34]. Tipovoy proyekt 704-1-70. Stalnoy vertikalnyy tsilindricheskyy rezervuar dlya nefi i nefteproduktov yemkostyu 20000 kub. m. Albom I. Rabochiye chertezhi KM rezervuara [Type design 704-1-70. Steel vertical cylindrical tank of 20000 volume for crude oil and refined products. Album I. Drawing design of tank]. Moscow : Research and Development Establishment Projectsteelconstructions of State Committee for Construction of the USSR, 1972. 46 p. (rus)
- [35]. Tsepliaev Maxim. Metal Constructions. 2016. Volume 22, Number 4. Pp. 183–192. (rus)

Контактная информация

- 1.* +380503680804, volodymyr.mushchanov@mail.ru (Мушанов Владимир Филиппович, д.т.н., профессор, проректор по научной работе)
2. +380508159347, zubienko_anna@mail.ru (Зубенко Анна Васильевна, ассистент)
3. +380713198229, m.s.sepliaev@donnasa.ru (Цепляев Максим Николаевич, аспирант)

Contact information

- 1.* +380503680804, volodymyr.mushchanov@mail.ru (Volodymyr Mushchanov, Ph.D., Professor, vice-rector for scientific work)
- 2.* +380508159347, zubienko_anna@mail.ru (Hanna Zubenko, Assistant)
3. +380713198229, m.s.sepliaev@donnasa.ru (Maxim Tsepliaev, Postgraduate)

© Мушанов В.Ф., Зубенко А.В., Цепляев М.Н., 2018