

В печать
9.02.2021.



На правах рукописи

Зубенко Анна Васильевна

Формирование ветровой нагрузки на элементы вертикального цилиндрического резервуара с учетом особенностей конструктивной формы и блочного расположения

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре теоретической и прикладной механики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
МУЩАНОВ Владимир Филиппович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
проректор по научной работе,
заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики.

Официальные оппоненты: **СТОРОЖЕВ Валерий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», проректор по научной и инновационной деятельности, заведующий кафедрой теории упругости и вычислительной математики им. академика А. С. Космодамианского
ЧЕРНЫШЕВ Дмитрий Давидович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлические и деревянные конструкции» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Защита состоится «16» апреля 2021 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38 (0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 01.006.02



Лахтарина Сергей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Вертикальные цилиндрические резервуары (ВЦР), применяемые для хранения нефти, нефтепродуктов, химикатов, воды, и разнообразных жидкостей, являются самой распространенной конструктивной формой в классе листовых конструкций, производство которых в современном промышленном производстве исчисляется миллионами тонн. При проектировании подобного рода сооружений необходимо учитывать одну из основных нагрузок, действующих на резервуар, - ветровую нагрузку, которая используется при расчете элементов конструкций на прочность и устойчивость. Особое внимание в этом случае необходимо уделять решению этой задачи не только для вновь проектируемых, но и для эксплуатируемых конструкций резервуаров, расположенных по блочному принципу, так как прогрессирующий со временем коррозионный износ верхних поясов резервуаров повышает опасность потери их устойчивости, а, следовательно, требует уточнения величины ветровой нагрузки для таких случаев, не отраженных в современных нормативных документах. Такого же уточнения нагрузки требует и применение в практике проектирования и строительства новых конструктивных форм ВЦР, в том числе, резервуаров больших объемов с провисающей стабилизированной мембранной кровлей.

Для решения этой задачи существуют различные способы определения аэродинамических характеристик с использованием аналитических и экспериментальных методов. При этом аналитические решения в строительной аэродинамике распространяются лишь на 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 экспериментальные исследования в аэродинамической трубе, которые являются надежным средством изучения процесса обтекания воздушным потоком зданий, сооружений и их комплексов. В последнее время с увеличением мощностей многопроцессорных вычислительных систем эти возможности расширились за счет применения способов компьютерного моделирования аэродинамических процессов.

Таким образом, потребности практики проектирования ВЦР в сочетании с современными возможностями исследований делают возможным и необходимым решение актуальной научно-технической задачи уточнения ветровых воздействий на элементы конструкции ВЦР новых конструктивных форм как одиночных, так и расположенных в группе.

Степень разработанности темы исследования.

Основные результаты по модельным экспериментальным исследованиям на действие снеговых и ветровых нагрузок на сооружения с большепролетными покрытиями сложной геометрии представлены в книгах Е. В. Горохова и П. Г. Еремеева. Ещё в 70-х годах в ЦНИИСК им. Кучеренко на принципах, изложенных в работах А. Давенпорта и А. Вайза, были разработаны основные методики расчета ветровых нагрузок на здания и сооружения, с использованием аэродинамических формул, которые реализованы в СНиП II-6-74. В 1985 г. при выпуске СНиП 2.01.07-85 были упрощены выражения, которые описывают динамическую реакцию сооружений при действии ветра. основополагающие сведения по теории архитектурно-строительной

аэродинамики по методикам для определения ветровых нагрузок на здания и сооружения описываются в работах Э. И. Реттера, Э. Симиу, Р. Сканлан, Т. Lawson. Методам экспериментального моделирования ветрового потока на здания и сооружения в аэродинамической трубе посвящены работы Е. В. Горохова, М. А. Березина, Y. Uematsu, Р. И. Кинаша, J. D. Holmes, С. А. Исаева. Исследования, посвященные численному моделированию ветровых воздействий, описываются в работах В. Ф. Мушанова, С. А. Исаева, Y. Tomimaga, А. Mochida и др.

Ряд вопросов, связанных с увеличением работоспособности резервуаров, несмотря на многочисленность работ по проектированию, строительству и эксплуатации резервуаров, остаётся открытым. Следует отметить следующие проблемы:

- нормативные документы, регламентирующие правила расчета и проектирования металлических конструкций, в том числе вертикальных цилиндрических резервуаров, указывают на необходимость уточнения аэродинамических характеристик для новых конструктивных форм покрытий резервуаров;
- недостаточно изучены ветровые нагрузки на вертикальный цилиндрический резервуар в одиночном расположении и в составе группы, невзирая на то, что для большинства нефтяных хранилищ такая компоновка является преобладающей; необходимы уточнения нормирования аэродинамических характеристик для конструктивных элементов ВЦР, состоящего в группе.

Все это, безусловно, свидетельствует об актуальности рассматриваемой проблемы влияния ветровой нагрузки на конструктивные элементы ВЦР с учетом влияния аэродинамически релевантных соседних объектов.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик:

1. Д-2-02-11 «Разработка комплексной модели обеспечения надежности большепролетных покрытий над трибунами стадионов на стадии проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации» (2011-2012 гг., гос. рег. №0111 U 001808), ДонНАСА;

2. Д-2-02-13 «Разработка уточняющих методов расчета напряженно-деформированного состояния элементов стальных строительных конструкций зданий и инженерных сооружений» (2013-2014 гг., гос. рег. №0113 U 001918), ДонНАСА;

3. Кафедральной темы К-2-07-16 «Усовершенствование аналитических и численных методов расчетов строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом воздействия факторов износа и фактической нелинейной работы материала» (2017–2020 гг., гос. рег. № 0117D000262), ДонНАСА.

Цель работы: разработка уточненной методики нормирования ветровой нагрузки на поверхность элементов вертикального цилиндрического резервуара с учетом группирования и для новых типов покрытия.

Задачи исследования:

- проанализировать конструктивные формы, особенности расчета и проектирования конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов; численные методы исследования ветрового давления и особен-

ности их реализации в современных программных комплексах; экспериментальные методы исследования ветрового давления и особенности их реализации при испытаниях в метеорологической аэродинамической трубе;

- обосновать план и методику проведения численных исследований путем верификации расчетных моделей известных конструктивных решений методами численного и физического моделирования;
- выполнить экспериментальные исследования ветрового давления на элементы конструкции модели ВЦР для известных конструктивных решений, а именно, с плоской и сферической кровлей, а также для новых конструктивных типов, таких как провисающие покрытия, в аэродинамической трубе;
- выполнить численные исследования ветрового давления на элементы конструкции ВЦР для известных конструктивных решений, а именно, с плоской и сферической кровлей, а также для новых конструктивных типов, таких как провисающие покрытия;
- разработать уточненную методику нормирования ветровой нагрузки на поверхность ВЦР для известных конструктивных решений, а именно, со сферической кровлей, а также для новых конструктивных типов, таких как провисающие покрытия отдельно стоящих резервуаров и в группе из четырех резервуаров.

Объект исследования – стальные вертикальные цилиндрические резервуары наземного типа для хранения нефти и нефтепродуктов со сферическими и провисающими типами покрытия.

Предмет исследования – закономерности изменения аэродинамических коэффициентов для конструктивных элементов вертикальных цилиндрических резервуаров с учетом группировки.

Научную новизну полученных результатов составляют:

- уточненные зависимости для определения значений аэродинамических коэффициентов для стенки и кровли ВЦР со сферическим типом покрытия с учетом их расположения в составе группы;
- установленные закономерности для вычисления значений аэродинамических коэффициентов для стенки и кровли отдельно стоящего ВЦР с провисающим стабилизированным мембранным покрытием;
- установленные закономерности для определения аэродинамических коэффициентов для стенки и кровли ВЦР с провисающим стабилизированным мембранным покрытием в составе группы.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

- впервые на основе результатов экспериментальных исследований и численного моделирования получены обобщенные зависимости для вычисления значений аэродинамических коэффициентов для поверхностей стенки и кровли ВЦР в виде сферического или провисающего стабилизированного покрытия с учетом одиночного расположения или в составе группы;
- предложена уточненная методика нормирования ветровой нагрузки на поверхность элементов ВЦР как с мембранными провисающими покрытиями, так и с покрытиями традиционной формы в составе группы или при одиночном расположении;

- получены табулированные значения аэродинамических коэффициентов для нормирования ветровой нагрузки на поверхность элементов ВЦР как с мембранными провисающими покрытиями, так и с покрытиями традиционной формы в составе группы или при одиночном расположении.

Методология и методы исследования.

Выполнялось численное моделирование ветрового воздействия на основании методов вычислительной гидродинамики в ПК SolidWorks Flow Simulation. Для создания численной модели решалась задача верификации ветрового воздействия на модель ВЦР, для которой в работе М. А. Березина были получены аэродинамические характеристики в аэродинамической трубе. Выполнен анализ экспериментальных методов исследования ветрового давления и особенности их реализации при испытаниях в метеорологической аэродинамической трубе и составлен план и методика проведения физического моделирования в аэродинамической трубе МАТ-1 ГОУ ВПО «ДОННАСА» с применением методов теории подобия. Для модели резервуара с плоской кровлей выполнялся тестовый эксперимент как верификационный для определения числа Рейнольдса, которое является критерием подобия при проведении аэродинамических экспериментов.

Также использовались универсальные программные пакеты MATHCAD, Microsoft Excel для обработки полученных аэродинамических характеристик.

Личный вклад соискателя заключается в следующем:

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором, состоят из анализа, обобщения, систематизации и обработки результатов численных и экспериментальных исследований, и заключаются в следующем:

- сбор, анализ, обобщение теоретических и экспериментальных данных по расчету ветровой нагрузки на поверхность ВЦР как с мембранными провисающими покрытиями, так и с покрытиями традиционной формы в составе группы;
- подготовка и проведение экспериментальных и численных исследований ветровой нагрузки на поверхность ВЦР как с мембранными провисающими покрытиями, так и с покрытиями традиционной формы в составе группы;
- разработка методики нормирования ветровой нагрузки на поверхность ВЦР как с мембранными провисающими покрытиями, так и с покрытиями традиционной формы в составе группы.

На защиту выносятся:

- методика вычисления уточненных аэродинамических коэффициентов для стенки и кровли вертикального цилиндрического резервуара как с провисающей, так и с традиционными типами кровель, с учетом влияния аэродинамически релевантных объектов группы;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований ветрового давления и значений аэродинамических коэффициентов для стенки и кровли вертикального цилиндрического резервуара как отдельно стоящего, так и в составе группы.

Степень достоверности результатов диссертации подтверждается результатами экспериментальной верификации модели, сравнением полученных значений с результатами других авторов и с известными аналитическими решениями. Также достоверность обеспечивается использованием лицензионных программных комплексов и поверенного измерительного оборудования.

Апробация результатов. Основные результаты работы и материалы исследований докладывались и обсуждались на:

- шести научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка) в 2012-2018 гг.;
- международной научно-практической конференции «Архитектура и искусство: от теории к практике» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 2018 г.);
- международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXIII научные чтения 29 апреля 2019 г., г. Белгород).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано самостоятельно и в соавторстве в 16 научных публикациях, в том числе 11 публикаций – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов; 3 – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS; 2 публикации по материалам научных конференций.

Общий объем публикаций 8,68 п.л., из которых 4,41 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и пяти приложений. Работа изложена на 246 страницах, в том числе 121 страница основного текста, 42 полных страницы с рисунками и таблицами, 9 страниц списка источников, 75 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности темы. Определена цель, задачи исследований, дана характеристика объекта и предмета исследований, сформулирована научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первом разделе анализируется состояние вопроса. Приводятся общие исторические этапы и предпосылки изучения вопроса. Рассматриваются основные конструктивные формы покрытий для вертикальных цилиндрических резервуаров. Выполнен обзор методов определения ветровой нагрузки (точных и приближенных), как основной характеристики. Рассмотрены основные подходы в современных нормативных документах России, Украины, США, стран ЕС по методике вычисления аэродинамических коэффициентов для конструктивных элементов сооружения с учетом влияния аэродинамически релевантных соседних объектов группы. Основные теоретические сведения об архитектурно-строительной аэродинамике, методиках определения ветровой нагрузки на здания и сооружения представлены в работах: J. D. Holmes, О. И. Поддаевой, Э. Симиу, Р. Сканлан, Э. И. Реттер, Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. Математическая модель гидродинамических процессов описана в работах В. Ф. Недопёкина. Экспериментальным методам определения ветровых воздействий на здания и сооружения в аэродинамической трубе посвящены работы Е. В. Горохова, J. T. Snæbjörnsson, Д. Д. Чернышева. Большой вклад в развитие и систематизацию данных по исследованию ветровой нагрузки на строительные конструкции различной формы

внесли М. А. Березин и В. В. Катюшин. На основании критического анализа сформулированы цель, методы и задачи исследования.

На основании критического анализа сформулированы цель, методы, задачи исследования и обоснован вывод о том, что актуальная проблема не получила систематического и полного решения и на сегодняшний день отсутствует обоснованный подход к ее решению. Решить данную проблему предлагается на основе численного и физического моделирования аэродинамических процессов для ВЦР с различными геометрическими параметрами, находящегося в составе группы.

Во втором разделе рассмотрены основные инструменты научных исследований, применяемых в настоящий момент в практике аэродинамического проектирования, а именно универсальный программный CFD-комплекс (Computational Fluid Dynamics) численного моделирования для решения сложных задач аэродинамических процессов, программный комплекс SolidWorks Flow Simulations и метод физического проведения эксперимента в аэродинамической трубе.

На основании полученных данных сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформированы расчетные схемы 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, которая является составляющей входных параметров.

Разработан методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком для модели резервуара в аэродинамической трубе, который заключается в обеспечении условия геометрического подобия модели и натуры. Значения коэффициента лобового сопротивления в зоне закритических значений Re для всех трех вариантов испытания модели с плоской кровлей близки и находятся в пределах 1,3%, принимая почти неизменное значение в пределах 0.39, что совпадает с нормативным значением ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. Єврокод 1.

На основе экспериментальной верификации для модели с известными аэродинамическими характеристиками составлена методика и план экспериментальных исследований для моделей ВЦР с различными типами конструктивной формы кровли в одиночном расположении и в группе. Исходя из необходимости получения достаточного уровня выходных сигналов датчиков давления, была принята рабочая скорость потока в аэродинамической трубе МАТ-1 ГОУ ВПО «ДОННАСА» $V = 14$ м/с, что составляет $Re = 1,18 \times 10^5$, при которой выполняется условие автомодельности.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований ветрового давления на элементы конструкций модели ВЦР в аэродинамической трубе. На рис. 1 показаны модели ВЦР с различным типом кровли с расстановкой 49 опорных точек, в которых предусматривается определение коэффициентов ветрового давления (C_{pi}).

По результатам эксперимента выполнен анализ влияния формы покрытия для моделей ВЦР отдельно стоящих, для моделей ВЦР с выпуклой кровлей с учетом группирования 4-х резервуаров, для моделей ВЦР с провисающей кровлей с учетом группирования 4-х резервуаров:

1. Анализируя полученные результаты, следует отметить удовлетворительную сходимость на большей части графика (в диапазоне от 0° до 120°), при значительных расхождениях в зоне действия вакуумметрического давления (от 120° до 180°) (рис. 2 б). Несмотря на эти различия, которые уменьшаются в отдельных случаях для значений, расположенных на других отметках, различие «в запас» позволяет использовать предложенный подход для решения задачи.

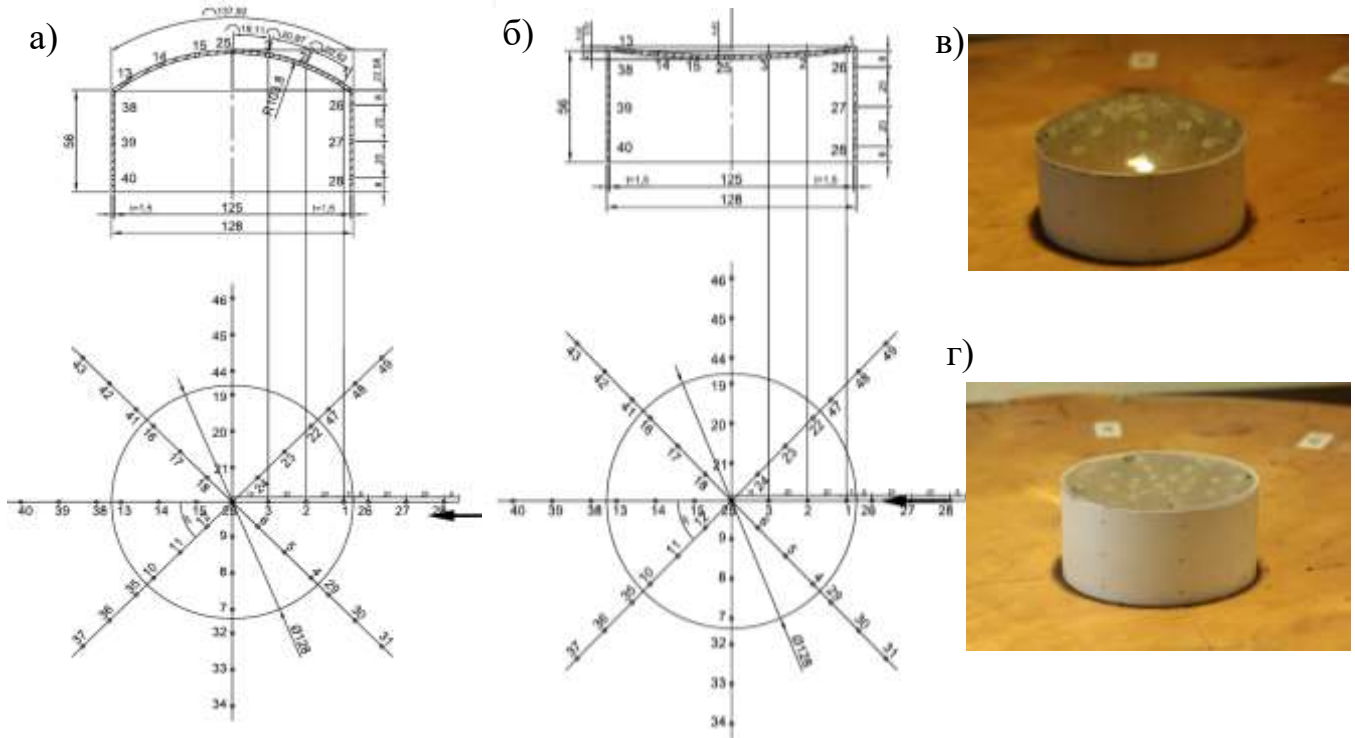


Рис. 1 Схема модели ВЦР с расстановкой опорных точек:

а) – ВЦР с выпуклой сферической кровлей, б) – ВЦР с вогнутой мембранной кровлей; в) дренированная модель ВЦР с выпуклой сферической кровлей; г) дренированная модель ВЦР с вогнутой мембранной кровлей

2. Переходя к анализу ветрового давления на конструктивные элементы модели резервуара, отдельно стоящего и находящегося в группе, необходимо отметить следующие закономерности:

- некоторое превышение абсолютных величин значений аэродинамических давлений, полученных в результате численных исследований, над экспериментальными при удовлетворительном совпадении качественной картины исследуемого явления;
- значительное влияние интерференционных эффектов для аэродинамических давлений на стенку резервуаров, эксплуатируемых в группе, по сравнению с одиночными резервуарами, отображаемых в современной нормативной литературе, достигающих максимальных отклонений для случая угла атаки $\beta = 180^\circ$ (на 80 – 90% для активного давления, на 50 – 60 % - для пассивного); в случае резервуаров с выпуклой сферической кровлей при угле атаки $\beta = 180^\circ$: на 40 – 60% для активного давления, на 70 – 80% - для пассивного; в случае резервуаров с провисающей сферической кровлей при угле атаки $\beta = 180^\circ$: на 40 – 60% для активного давления, на 70 – 80% - для пассивного;
- несколько меньшее, но все равно значительное влияние интерференционных эффектов для аэродинамических давлений на кровлю резервуаров, эксплуатируемых в

группе, по сравнению с одиночными резервуарами, достигающих максимальных отклонений;

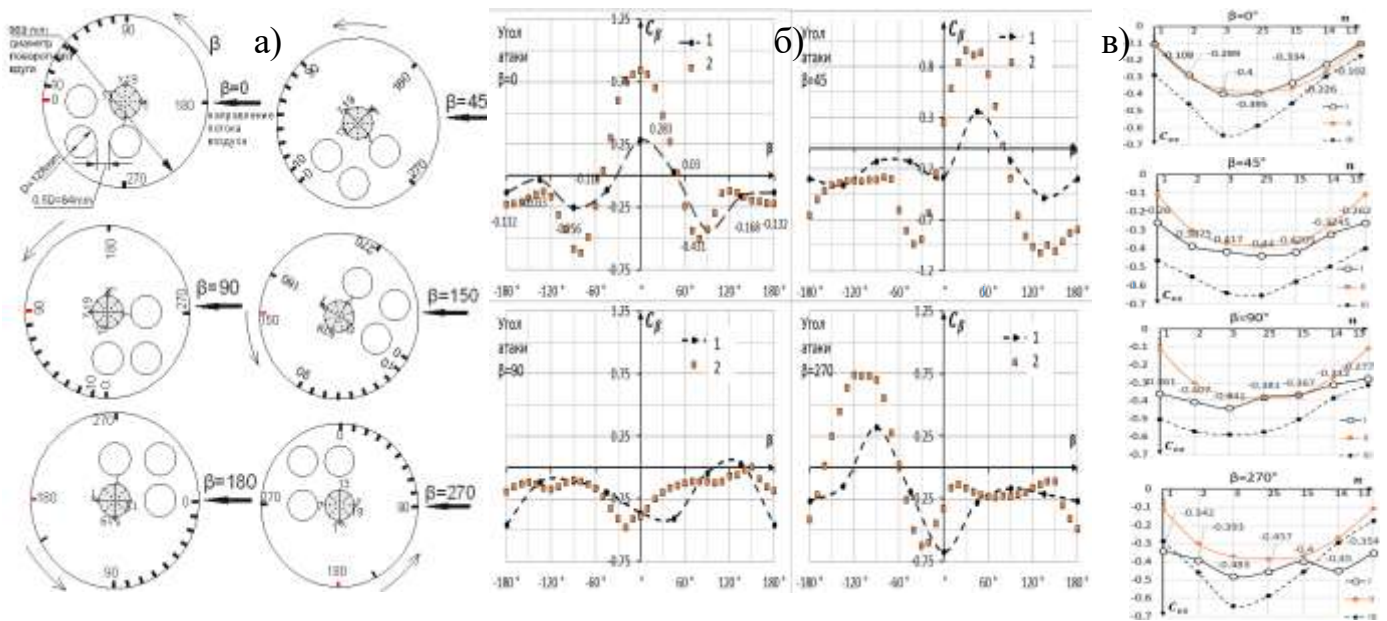


Рис. 2 Анализ влияния «блочности» 4-х резервуаров для моделей конструкций ВЦР с выпуклой кровлей.

- а) компоновка группы вертикальных цилиндрических резервуаров в МАТ-1 и установка моделей на поворотном круге с градуировкой при различном направлении ветрового потока;
 б) графики распределения аэродинамических коэффициентов по стенке резервуара в группе с выпуклой кровлей (1 – значения, полученные в МАТ-1; 2 – значения, полученные численно)
 в) графики распределения аэродинамических коэффициентов по кровле резервуара в группе с выпуклой кровлей (1 – значения, полученные в МАТ-1; 2 – значения, полученные численно).

3. Изложенное выше свидетельствует о существенном влиянии блочного расположения резервуаров на значения аэродинамических коэффициентов ветрового давления, действующего на их основные конструктивные элементы (стенку и кровлю). Удовлетворительное в большинстве рассматриваемых случаев совпадение результатов физического эксперимента и численного моделирования позволяет распространить сформированные конечно-элементные модели на случаи дальнейшего исследования изучаемых явлений в конечно-элементной постановке при варьировании основных геометрических параметров изучаемых объектов.

В четвертом разделе приведены результаты численных исследований ветрового давления на элементы конструкции модели ВЦР в аэродинамической трубе. По результатам эксперимента выполнен анализ влияния формы покрытия для моделей одиночных ВЦР, для моделей конструкций ВЦР с выпуклой кровлей с учетом группирования 4-х резервуаров, для моделей конструкций ВЦР с провисающей кровлей с учетом группирования 4-х резервуаров.

На основании сравнительного анализа экспериментальных, аналитических и нормативных данных сформирована расчетная схема для расчета одиночного вертикального резервуара объемом 10 – 30 тыс. м³ со сферической выпуклой кровлей в среде SolidWorks Flow Simulation для численного моделирования аэродинамических

процессов. Основной особенностью этой процедуры стала составляющая определения размера области компьютерного моделирования и размеров ячеек расчетного домена, заключающаяся в определении граничных и начальных условий задачи. На рис. 3 показаны расчетные схемы ВЦР для численного моделирования.

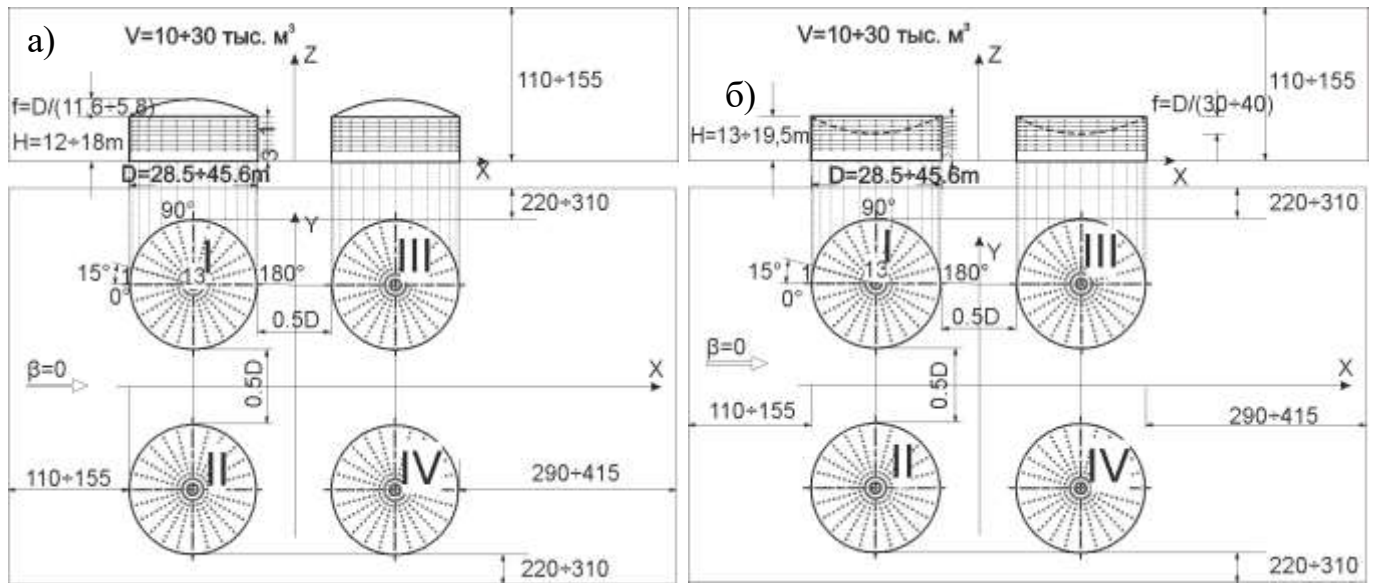


Рис. 3 Расчетная схема с варьируемыми параметрами для ВЦР, состоящего в группе.

а) со сферическим покрытием; б) с провисающим покрытием.

Основным результатом, изложенным в этом разделе, стал разработанный методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком стенки резервуара, основные этапы которого заключаются в определении:

- размеров расчетной области;
- величины ячеек сетки расчетного домена;
- расчетного значения скорости по методике национальных норм;
- значения интенсивности турбулентности;
- значения продольного интегрального масштаба турбулентности;
- критериев сходимости расчетного процесса.

Верификация предложенного методического подхода на примере отдельно стоящего резервуара с выпуклой кровлей подтвердила корректность разработанной процедуры (сравнение результатов нормативных данных и результатов численного исследования обеспечивает сходимость в пределах 10 % для основных расчетных сечений при коэффициенте корреляции 0.92...0.97). Анализируя полученные численные результаты для резервуара с провисающей кровлей в составе группы, можно отметить следующие закономерности:

- для стенки: увеличение активного давления до 8 %, для пассивного – 15 %;
- для кровли: уменьшение пассивного давления в зависимости от расположения в группе от 15 до 45% по сравнению с одиночным расположением ВЦР.

В пятом разделе разработана уточненная методика нормирования ветровой нагрузки на стенку и покрытие вертикальных цилиндрических резервуаров, отличающаяся от ранее применяемых:

- ориентацией на конечно-элементный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции;
- возможностью нормирования ветровой нагрузки для ВЦР с провисающим покрытием;
- возможностью учета блочного расположения резервуаров.

Для определения значения нормативных аэродинамических коэффициентов для стенки ВЦР была предложена целевая функция $C_{p0}(a, \beta)$, зависящая от угловой координаты β и коэффициентов a , полученных путем аппроксимации целевой функции (1), исходя из анализа научных работ, рассмотренных в разделе 1:

$$C_{p0}(a, \beta) := \sum_{m=0}^k \left(a_m \cdot \cos\left(\frac{\beta \cdot m \cdot \pi}{180}\right) \right) \quad (1)$$

где β – угловая координата образующей поверхности стенки резервуара;

a_m – свободные члены зависимости $C_{p0}(a, \beta)$.

Для определения значений аэродинамических коэффициентов, используемых в нормативных документах для сферической кровли ВЦР, предложена целевая функция $C_{p0}\left(a_k, X, \beta, \frac{H}{D}, \frac{f}{D}\right)$, зависящая от угловой координаты β , координаты для радиального элемента X , и коэффициентов a , полученных путем аппроксимации целевой функции (формула 2):

$$\begin{aligned} & C_{p0}\left(a_k, X, \beta, \frac{H}{D}, \frac{f}{D}\right) = \\ & = \sum_{k=0}^{k1} a_k \cos\left(\frac{\pi \cdot \beta \cdot k}{180}\right) \cdot \left(\sum_{k=k2}^{k21} a_k \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot X \cdot (k - k2)}{180}\right) \right) \\ & \quad + \left(a_{k3} \cdot \frac{H}{D} + a_{k4} \cdot \frac{f}{D} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где

a_k – свободные члены, которые определялись по результатам численного эксперимента;

β – угловая координата;

X – относительная координата, определяемая как X/D ;

$x_{i,j} := \cos\left(\frac{2\pi \cdot j}{cols(z)-1}\right)$; $cols(z) - 1$ – количество столбцов, зависит от шага угловой координаты

H/D – критерий соотношения высоты к диаметру ВЦР;

f/D – критерий соотношения стрелы подъема к диаметру ВЦР;

$k1 = 5$; $k2 = k1 + 1$; $k21 = k2 + 4$; $k3 = k21 + 1$; $k4 = k3 + 1$ – аппроксимационные коэффициенты.

На рис. 4 показано сравнение нормативных значений аэродинамических коэффициентов, полученных по функциональной зависимости по формуле (1), и проинтерполированных при различных числах Рейнольдса для нормативной кривой [ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010, СП 20.13330.2016].

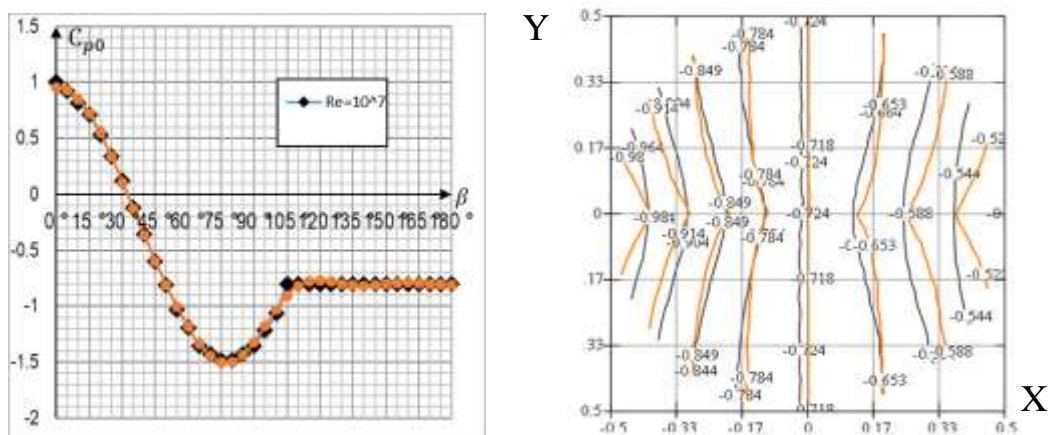


Рис. 4 Сравнение нормативных значений аэродинамических коэффициентов, полученных по формуле (1) для стенки и (2) для кровли, проинтерполированных по графикам [ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010, СП 20.13330.2016].

Методический подход, разработанный для нормирования, также верифицирован путем сравнения данных по нагрузке на стенку и кровлю отдельного стоящего вертикального цилиндрического резервуара со сферическим покрытием, вычисленных по методике, предложенной автором, и по ранее разработанным подходам, используемым в существующих нормах проектирования. Зафиксированное расхождение составило не более 1,5%.

Уточненные значения аэродинамических коэффициентов с учетом реального распределения ветрового потока для стенки ВЦР, состоящего в группе, предлагается определять по целевой функции (формула 3) (рис. 4).

$$C_{p0} \left(a_k, z_h, \beta, \frac{H}{D}, \frac{f}{D} \right) = \left(\sum_{k=0}^k a_k \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot \beta \cdot k}{180} \right) + \sum_{k=k1}^{k12} a_k \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot \beta \cdot (k - k1)}{180} \right) \right) \cdot \left(\sum_{k=k2}^{k21} a_k \cdot z_h^{(k-k2)} \right) + \left(a_{k3} \cdot \frac{H}{D} + a_{k4} \cdot \frac{f}{D} \right) \quad (3)$$

где

a_k – свободные члены, которые определялись по результатам численного эксперимента;

β – угловая координата;

z_h – относительная высотная координата, определяемая как z/H ;

$z_{h_j} = \frac{j+3}{H}$; где $j = 0, 1, \dots, (H - 3)$

$(H - 3)$ – критерий, учитывающий равномерное распределение ветровой нагрузки на уровне 3 м от поверхности основания ВЦР;

H/D – критерий соотношения высоты к диаметру ВЦР;

f/D – критерий соотношения стрелы подъема к диаметру ВЦР;

$$k = 4; k1 = k + 1; k12 = k1 + 4; k21 = k2 + 8; k3 = k21 + 1; k4 = k3 + 1$$

Уточненные значения аэродинамических коэффициентов с учетом реального распределения ветрового потока для кровли ВЦР, состоящего в группе, предлагается определять по целевой функции (формула 2).

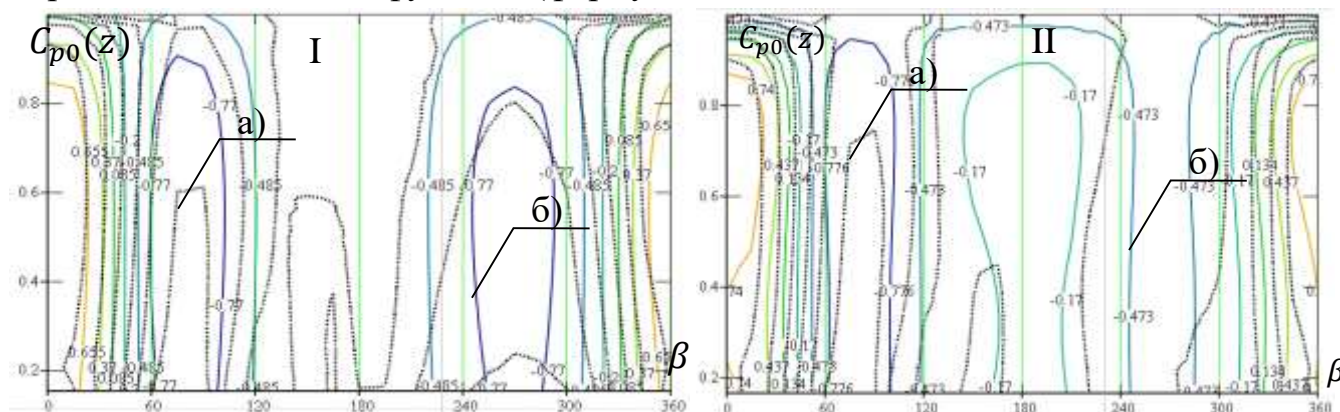


Рис. 5 Схема распределения значений аэродинамических коэффициентов, полученных для стенки ВЦР

где I) с провисающей кровлей, состоящего в группе;

II) со сферической кровлей, состоящего в группе

а) черный пунктир – контурный график функции аэродинамических коэффициентов C_{p0} , полученных по результатам численного эксперимента; б) цветной контур – по методике.

С использованием верифицированного методического подхода для нормирования ветровых нагрузок на кровлю и стенку резервуаров с провисающей кровлей, а также на стенку и кровлю резервуаров, состоящих в группе, впервые предложены расчетные формулы в виде одинарного и двойного тригонометрического рядов, которые наряду с другими известными преимуществами обеспечивают возможность алгоритмизации проводимых расчетов по определению ветровых нагрузок при анализе напряженно-деформированного состояния объектов с использованием метода конечных элементов.

ВЫВОДЫ

Достигнута основная цель работы, заключающаяся в разработке уточненной методики нормирования ветровой нагрузки на поверхность элементов вертикального цилиндрического резервуара с учетом группирования и для новых типов покрытия, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Уточнение нормирования аэродинамических характеристик для конструктивных элементов ВЦР, в том числе с провисающим покрытием как одиночных, так и состоящих в группе, обосновано выполненным критическим анализом применяемых конструктивных форм, особенностей расчета и проектирования ВЦР для хранения нефти и нефтепродуктов больших объемов (10...30 тыс. м³),

состоящих в групповом расположении, возможностей имитационного и экспериментального моделирования ветровых воздействий на строительные конструкции инженерных сооружений.

2. Выполнено обоснование плана и методики проведения численных исследований по уточнению величин аэродинамических коэффициентов для расчетных схем, не представленных в современной нормативной литературе (отдельно стоящий резервуар с провисающим покрытием, резервуары со сферическим и провисающим покрытиями при блочном расположении) с использованием верификации данных для расчетных моделей известных конструктивных решений ВЦР методами численного и физического моделирования
3. Экспериментальные исследования ветрового давления на элементы модели ВЦР, проведенные в малой аэродинамической трубе ГОУ ПВО «ДОННАСА», позволили установить:
 - верификационными испытаниями для известных конструктивных решений (одиночный резервуар с плоской или сферической кровлей): удовлетворительную сходимость с результатами ранее выполненных исследований на большей части окружности резервуара (в диапазоне от 0° до 270° по отношению к направлению ветра);
 - для новых конструктивных типов (ВЦР с провисающими покрытиями как при одиночном, так и групповом расположении): существенное влияние блочного расположения резервуаров на значения аэродинамических коэффициентов ветрового давления, действующего на их основные конструктивные элементы (как на стенку, так и кровлю), составившее для активного давления до 35 %, для пассивного – до 55 %.
4. Выполненные с использованием программного комплекса Solidworks Flow Simulation численные исследования ветрового давления на элементы конструкции ВЦР как для известных, так и новых конструктивных решений подтвердили с высокой степенью достоверности совпадение с данными экспериментальных исследований, что стало обоснованием для проведения численных исследований для типоразмеров ВЦР, не охваченных физическим экспериментом. Выполненный численный эксперимент позволил установить:
 - для резервуаров со сферическим покрытием учет блочного расположения резервуаров по отношению к отдельно стоящему резервуару позволил зафиксировать:
 - для стенки: увеличение активного давления до 15%, для пассивного – 10 %
 - для кровли: уменьшение пассивного давления в зависимости от расположения в группе от 10% до 35 %;

- для отдельно стоящего резервуара с провисающим покрытием по отношению к резервуару со сферическим покрытием:
для стенки: увеличение активного давления до 5 %, уменьшение для пассивного – 20 %
для кровли: уменьшение пассивного давления до 30%;
 - для резервуара с провисающим покрытием учет блочного расположения резервуаров по отношению к отдельно стоящему резервуару позволил зафиксировать:
для стенки: увеличение активного давления до 8 %, для пассивного – 15 %
для кровли: уменьшение пассивного давления в зависимости от расположения в группе от 15 до 45% по сравнению с одиночным расположением ВЦР.
5. Разработана уточненная методика нормирования ветровой нагрузки на стенку и покрытие вертикальных цилиндрических резервуаров, отличающаяся от ранее применяемых:
- ориентацией на конечно-элементный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции,
 - возможностью нормирования ветровой нагрузки для ВЦР с провисающим покрытием;
 - возможностью учета блочного расположения резервуаров.
6. Результаты исследований внедрены в практику проектирования проектной организацией ООО «Донецкий ПромстройНИИпроект» при уточненном определении ветровых нагрузок на емкостные конструкции цилиндрической формы в рамках выполнения договоров № 2581 (2014 г.) и № 20-1/15/45-15/8-ООЗС (2015 г.).
7. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке специалистов по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство», магистерская программа «Теория и проектирование зданий и сооружений», в лекционном материале дисциплин «Расчет и проектирование зданий и сооружений».

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата:

1. Зубенко, А. В. Влияние цилиндрической оболочки на характеристики напряженно-деформированного состояния висячей оболочки [Текст] / А. В. Зубенко, А. Г. Варданян // Вісник ДонНАБА. – 2011. – Вып. 2011-3(89). – С. 10-13.
2. Мущанов, В. Ф. Влияние мембранного покрытия на напряженно-деформированное состояние стенки ВЦР [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, А. Г. Варданян // Металлические конструкции. – 2011. – Том 17, № 1. – С. 33-49.
3. Экспериментальное определение аэродинамических коэффициентов для покрытий различной кривизны и стенки вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, С. Г. Кузнецов [и др.] // Вестник ДонНАСА. – 2012. – Вып. 2012-3(95). – С. 27-34.
4. Mushchanov, V. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface [Текст] / V. Mushchanov, G. Zubenko, I. Moskalenko // Металлические конструкции. – 2013. – Том 19, № 3. – С. 173-181.
5. Mushchanov, V. Wind load definition on vertical cylindrical tank with membrane roof in the group [Текст] / V. Mushchanov, H. Zubenko // Металлические конструкции. – 2014. – Том 20, № 4. – С. 235-243.
6. Особенности обтекания ветровым потоком тел вращения в строительной аэродинамике [Текст] / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, Э. А. Лозинский [и др.] // Металлические конструкции. – 2015. – Том 21, № 2. – С. 99-106.
7. Мущанов, В. Ф. Модельные испытания вертикальных цилиндрических резервуаров и верификация численных исследований [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, А. А. Дроздов // Металлические конструкции. – 2016. – Том 22, № 2. – С. 91-97.
8. Мущанов, В. Ф. Исследование аэродинамических коэффициентов провисающих мембранных покрытий инженерных сооружений [Электронный ресурс] / В. Ф. Мущанов, А.В. Зубенко, А. А. Дроздов // Металлические конструкции. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 81-96. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-2/04_mushchanov_zubenko_drozdov.pdf.
9. Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар [Электронный ресурс] / Р. Н. Степанов, Д. И. Роменский, В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко // Науковедение : Интернет-журнал. – 2017. – Том 9, № 6. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf>.

10.Зубенко, А. В. Методика формирования ветровой нагрузки при групповом расположении резервуаров [Электронный ресурс] / А. В. Зубенко// Металлические конструкции. – 2018. – Том 24, № 4. – С. 81-96. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2018-4/01_zubenko.pdf.

11.Мущанов, В. Ф. Уточнение нормативных выражений для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости при действии ветровой нагрузки [Электронный ресурс] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев // Металлические конструкции. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 25-35. Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-1/03_mushchanov_tcepli-aev_zubenko.pdf.

– публикации в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:

12.Refined methods for calculating and designing engineering structures [Электронный ресурс] / V. P. Mushchanov, A. V. Zubenko, A. N. Orzhekhovskii, S. A. Fomenko // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – 83(7). – Р. 49–62. – Режим доступа: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/2\(78\)/08.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/2(78)/08.pdf).

13. Мущанов, В. Ф. Напряжения в кровле резервуара, состоящего в группе, при действии ветра [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 5(68). – С. 36-51.

14.Мущанов, В. Ф. Напряжения от ветровой нагрузки в стенке резервуара, находящегося в группе [Электронный ресурс] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 7 (83). – С. 49-62. – Режим доступа: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2018.83.5/>.

– публикации по материалам научных конференций:

15.Мущанов, В. Ф. Особенности формирования ветровой нагрузки на инженерные сооружения при компьютерном моделировании [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко// Архитектура и искусство: от теории к практике : Сборник тезисов Международной научно-практической конференции / отв. ред. А. М. Иванова-Ильичева, О. А. Кудинов ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2018. – С. 385-394.

16.Мущанов, В. Ф. Уточненные подходы к расчету и проектированию вертикальных цилиндрических резервуаров, эксплуатируемых в составе группы [Текст] / В. Ф. Мущанов, А. В. Зубенко, М. Н. Цепляев // Научно-технологические инновации : эл. сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 80-85.

АННОТАЦИЯ

Зубенко Анна Васильевна. **Формирование ветровой нагрузки на элементы вертикального цилиндрического резервуара с учетом особенностей конструктивной формы и блочного расположения** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2021 г.

Диссертация посвящена разработке уточненной методики нормирования ветровой нагрузки на поверхность элементов вертикального цилиндрического резервуара с учетом группирования и для новых типов покрытия.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована научная новизна, практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

В первом разделе выполнен анализ проектных решений ВЦР и методов расчета.

Во втором разделе рассмотрены современные методы численного моделирования аэродинамических процессов на сооружения массового строительства, и особенности их реализации в современных программных комплексах. Выполнен анализ экспериментальных методов исследования ветрового давления и особенности их реализации при испытаниях в метеорологической аэродинамической трубе.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований ветрового давления на элементы конструкций модели ВЦР в аэродинамической трубе. По результатам эксперимента выполнен анализ влияния формы покрытия для моделей ВЦР отдельно стоящих, для моделей конструкций ВЦР с выпуклой кровлей с учетом группирования резервуаров, для моделей конструкций ВЦР с провисающей кровлей с учетом группирования резервуаров.

В четвертом разделе приведены результаты численных исследований ветрового давления на элементы конструкций модели ВЦР в аэродинамической трубе. По результатам эксперимента выполнен анализ влияния формы покрытия для моделей одиночных ВЦР, для моделей конструкций ВЦР с выпуклой кровлей с учетом группирования 4-х резервуаров, для моделей конструкций ВЦР с провисающей кровлей с учетом группирования 4-х резервуаров.

В пятом разделе предлагается методика нормирования уточненной ветровой нагрузки на элементы вертикального цилиндрического резервуара с провисающей кровлей, на элементы резервуара с выпуклой кровлей, находящегося в группе из 4 резервуаров, и на элементы резервуара с провисающей кровлей, находящегося в группе из 4 вертикальных цилиндрических резервуаров.

Ключевые слова: аэродинамический коэффициент, вертикальный цилиндрический резервуар, ветровая нагрузка, аэродинамическая труба, напряженно-деформированное состояние.

ABSTRACT

Zubenko Anna Vasilivna. Formation of wind load on the elements of a vertical cylindrical tank, taking into account the features of the structural form and block arrangement - Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2021.

The dissertation is devoted to the study of experimental and theoretical studies of the influence of aerodynamically relevant objects in the neighborhood on the stress-strain state of a vertical cylindrical tank with structural features of the roof.

In the introduction, relevance is substantiated, scientific novelty, practical value of the work are formulated, its general characteristic is given.

In the first section, an analysis of design decisions of the VCR and calculation methods is performed.

The second section discusses modern methods of numerical modeling of aerodynamic processes for mass construction, and the features of their implementation in modern software systems. The analysis of experimental methods for studying wind pressure and the peculiarities of their implementation in tests in a meteorological wind tunnel

The third section presents the results of experimental studies of wind pressure on structural the elements of the model in a wind tunnel. Based on the results of the experiment, an analysis was made of the influence of the coating form for freestanding models, for models with a convex roof taking into account “blockiness” in the group of 4 tanks, for models with the sagging roof taking into account “blockiness” in the group 4 vertical cylindrical tanks.

The fourth section presents the results of numerical studies of wind pressure on structural elements of the vertical cylindrical tank model in a wind tunnel. Based on the results of the experiment, an analysis was made of the influence of the coating form for models of single vertical cylindrical tank, for models of vertical cylindrical tank designs with a convex roof taking into account “blockiness” in the group of 4 tanks, for models of designs with the sagging roof taking into account “blocking” in the group of 4 vertical cylindrical tanks.

The fifth section proposes a method for normalizing the specified wind load on elements of a vertical cylindrical tank with a hanging roof, on elements of a tank with a convex roof, located in a group of 4 tanks, and on elements of a tank with a sagging roof, in a group of 4 vertical cylindrical tanks.

Keywords: aerodynamic coefficient, vertical cylindrical tank, wind load, wind tunnel, stress-strain state.