Dag. 2020

На правах рукописи

-CANOD

# Титков Сергей Олегович

# УТОЧНЕНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА БАШЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГРАДИРНИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНОЙ ФОРМЫ И ЭТАПОВ ВОЗВЕДЕНИЯ

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель:

Югов Михайлович, Анатолий доктор технических профессор ГОУ наук, ВПО «Донбасская национальная академия строительства архитектуры», заведующий кафедрой технологии организации И строительства

Официальные оппоненты: Зверев Виталий Валентинович, доктор технических профессор наук, ФГБОУ BO «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой металлических конструкций;

Гаранжа Игорь Михайлович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», доцент кафедры металлических и деревянных конструкций.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Защита состоится «03» марта 2023 г., в  $10^{00}$  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: +7-856-343-70-33, 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 «\_\_»\_\_\_\_2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.01.006.02

Лахтарина Сергей Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время существует ряд не полностью решенных научно-технических задач при разработке качественных проектов башенных каркасно-обшивных градирен. При этом основной проблемой является отсутствие в нормативных документах обоснованных значений нагрузок и воздействий на данное сооружение. Современное программное обеспечение, с помощью которого проектировщики выполняют расчеты, позволяет успешно моделировать сооружения любой сложности на всех этапах жизненного цикла с учетом различного рода нагрузок и воздействий. Разработка нормативных документов является важной задачей в этой области.

Анализ отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих нагрузки на башенные металлические градирни (БМГ), свидетельствует об отсутствии эпюр, характеризующих распределение локальных аэродинамических коэффициентов по периметру сечения градирни. Отсутствие эпюр ветрового давления в нормативных документах не дает полной оценки характера воздействия на конструкции БМГ.

Результаты исследований особенностей ветрового воздействия с учетом конструктивной формы и процесса возведения позволят уточнить значения ветрового давления на БМГ, а также разработать и дополнить методику проектирования металлических отдельно стоящих башенных градирен, повысить качество проектирования, и положительно отразится на работе сооружения в условиях эксплуатации.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственными научно-исследовательскими темами:

- -K2-13-16 «Инновационные энергоресурсосберегающие организационнотехнологические процессы возведения и реконструкции зданий и сооружений» (гос. регистр. №0117D000268);
- —K2-12-21 «Развитие конструктивных систем и организационнотехнологических процессов для зданий и сооружений на этапах жизненного цикла» (гос. регистр. №0121D000089)

#### Степень разработанности темы.

Среди отечественных и зарубежных специалистов значительный вклад в развитие методов расчета конструкций, зданий и сооружений на ветровую нагрузку внесли М.Ф. Барштейн, А.М. Белостоцкий, М.А. Березин, А.С. Барнштейн, Л.С. Гандин, С.А. Герценштейн, С.М. Горлин, С.И. Девнин, М.И. Казакевич, М.С. Комаров, В.Б. Курзин, А.М. Луговцев, В.П. Мугалев, В.В. Назаренко, И.В. Некрасов, А.Е. Орданович, Н.А. Попов, А.И. Рябинин, Г.А.

Савицкий, В.А. Самсонов, Е.В. Соловьева, К.С. Стрелков, В.И. Травуш, К.К. Федяевский, Г.М. Фомина, Г.Е. Худяков, А.И. Цейтлин, R.H. Ashley, R.L. Bisplinghof, N.J. Cook, A.G. Davenport, J.P. Den-Hartog, O.M. Griffin, R.L. Halfinan, G.N. Koopmann, S.E. Ramberg, R.H. Scanlan, E. Simiu, R.A. Skop, Y.G. Solari.

Исследователями в области экспериментальной оценки аэродинамических характеристик строительных сооружений занимались отечественные и зарубежные ученые, такие как: А.Б. Айрапетов, М.А. Березин, В.Г. Гагарин, С.М. Горлин, Е.В. Горохов, С.В. Гувернюк, М.И. Казакевич, В.В. Катюшин, С.Г. Кузнецов, С.В. Николев, Б.В. Остроумов, Н.А. Попов, С.Д. Саленко, Ю.А. Табунщиков, В. Blocken, А.G. Davenport, С.Р.W.Geurts, А. Kareem.

Анализ отечественных и зарубежных норм по определению ветрового воздействия сооружения показывает, на здания что отсутствует исчерпывающий ответ на вопрос об определении эпюр распределения локальных аэродинамических коэффициентов на БМГ. Данные нормы распространяются на здания и сооружения простой геометрической формы. Для градирен данные нормативные документы рекомендуют устанавливать аэродинамические коэффициенты в специальных рекомендациях, а также допускается уточнение на основе модельных аэродинамических испытаний.

В руководстве по расчету зданий и сооружений на действие ветра ЦНИИСК им. Кучеренко регламентирован порядок и сбор ветровой нагрузки на башенные металлические градирни. Указаны аэродинамические коэффициенты для круглого сечения БМГ, аналогичных резервуарам и дымовым трубам, что, в свою очередь, не совсем корректно. Приведены коэффициенты давления для шероховатых оболочек, имеющих формы гиперболоида, что применимо только для железобетонных гиперболических градирен.

Это свидетельствует об актуальности рассматриваемой проблемы оценки влияния ветровой нагрузки на башенные металлические градирни.

**Целью исследования** является разработка уточненной методики нормирования ветровой нагрузки на сооружение БМГ с учетом особенностей конструктивной формы и процесса возведения на основании детальных исследований моделей объекта в аэродинамической трубе и сравнительного численного анализа.

**Научная гипотеза** заключается в возможности определения влияния конструктивной формы и последовательности возведения башенных металлических каркасно-обшивных градирен на значения аэродинамических коэффициентов и их распределения по поверхности сооружения на основе проведения экспериментальных и численных исследований.

На основе выполненного критического анализа конструктивных решений, методов расчета и проектирования, сформулированы следующие задачи исследования:

- 1. воссоздать масштабные модели физических процессов, подобных натурным, при исследовании ветровых воздействий на сооружения градирен с учетом особенностей конструктивной формы и процесса возведения в лаборатории строительной аэродинамики ДОННАСА;
- 2. выполнить экспериментальные исследования значений и распределения давления ветрового потока с учетом конструктивной формы на различных стадиях возведения;
- 3. выполнить визуализацию обтекания воздушным потоком выборки моделей башенных каркасно-обшивных градирен различной конструктивной формы методом нитей «шелковинок» с целью определения амплитуды и траектории образуемых завихрений;
- 4. осуществить визуализацию обтекания воздушным потоком выборки моделей башенных каркасно-обшивных градирен различной конструктивной формы методом лазерного ножа «велосиметрия» с целью выявления характера и последующим выбором теории численного расчета;
- 5. определить расчетные ситуации с наиболее существенным вкладом в НДС на стадии возведения и эксплуатации башенных каркасно-обшивных градирен от влияния ветровой нагрузки;
- 6. разработать инженерную методику определения эпюр распределения давления ветрового потока на каркасно-обшивные башенные металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и процесса возведения.

**Объект исследования** — отдельно стоящие каркасно-обшивные башенные металлические градирни площадью орошения до 1600м<sup>2</sup>.

**Предмет исследования** - закономерности изменения аэродинамических коэффициентов в зависимости от конструктивной формы сооружения с учетом различных стадий возведения отдельно стоящих башенных каркасно-обшивных металлических градирен.

## Научную новизну полученных результатов составляют:

- —на основе анализа экспериментальных и численных исследований ветрового давления уточнены аэродинамические коэффициенты на отдельно стоящие башенные металлические каркасно-обшивные градирни;
- -получены уточненные аэродинамические коэффициенты на отдельно стоящие башенные каркасно-обшивные металлические градирни для различных стадий монтажа;
  - -на основе анализа экспериментальных и численных исследований выявлены

наиболее опасные расчетные ситуации при определении сочетаний нагрузок и воздействий;

**Теоретическая и практическая значимость** полученных результатов состоит в следующем:

- —на основе проанализированных экспериментальных данных получены выражения для вычисления уточненных аэродинамических коэффициентов для башенных каркасно-обшивных металлических градирен с учетом эксплуатации в зимний и летний период времени;
- —на основе экспериментальных данных получены выражения для вычисления уточненных аэродинамических коэффициентов для башенных каркасно-обшивных металлических градирен с учетом особенностей конструктивной формы и процесса возведения;
- -для башенных металлических каркасно-обшивных градирен площадью орошения до  $1600 \text{м}^2$  предложена уточненная методика нормирования ветровой нагрузки с учетом особенностей конструктивной формы и процесса возведения.

#### Методология и методы исследования:

Поставленные в работе задачи решаются с использованием следующих методов:

- -эмпирического и теоретического исследования (эксперимент, моделирование, анализ и синтез);
- -физического моделирования с использованием теории подобия, аэродинамических методов испытаний моделей сооружений;
- -численного моделирования с использованием метода конечных объемов и метода конечных элементов

## Положения, выносимые на защиту:

- -методика проведения модельных экспериментальных исследований для отдельно стоящих башенных металлических градирен с учетом особенностей конструктивной формы;
- результаты численных и экспериментальных исследований аэродинамики башенных металлических градирен с учетом особенностей конструктивной формы;
- методика нормирования ветровой нагрузки на конструкции башенных металлических градирен с учетом особенностей конструктивной формы.

**Личный вклад соискателя** заключается в формулировании цели и задач исследования, разработке и применении метода лазерного ножа «велосиметрия» для визуализации обтекания моделей ветровым потоком в дозвуковой метеорологической аэродинамической трубе с длинным рабочим каналом.

Разработка алгоритма автоматизированного расчета локальных аэродинамических коэффициентов Ср. Разработка и изготовление уточненных физических моделей по средствам 3D печати, выполнение экспериментальных исследований, теоретической обработке и интерпретация полученных данных с численными исследованиями, оценке НДС исследуемого объекта, формулирование общих выводов и рекомендаций, внедрение результатов работы. Представленные в диссертационной работе результаты получены автором самостоятельно. Отдельные составляющие результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые изложены в списке публикаций.

Степень результатов достоверности подтверждена данными исследований, экспериментальных которые выполнены применением современных технологий и оборудования со статистической обработкой данных, а также удовлетворительной сходимостью численных исследований аэродинамического воздействия с полученными экспериментальными данными.

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

- пяти научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка) в 2016-2020 гг.
- на научно-техническом совете фирмы ООО «Дальневосточный инженерный центр» г. Хабаровск.
- на научно-техническом совете фирмы ООО «Сталь проект» г. Москва. **Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы автором в пяти статьях в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы (157 наименования) и приложений. Общий объем работы составляет 179 страниц, в том числе 127 страниц основного текста, 31 полных страниц с рисунками и таблицами, 15 страниц списка использованной литературы, 52 страницы приложений.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи исследований, объект и предмет исследования, научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первом разделе** представлен критический анализ состояния вопроса. Рассмотрены особенности конструктивной формы башенных каркасно-обшивных металлических градирен. Приведена классификация данных сооружений и

рассмотрен принцип работы данных сооружений с точки зрения сооружения и аппарата для охлаждения воды атмосферным воздухом.

В развитие теории и практики градирен значительный вклад внесли отечественные ученые и проектировщики – В.Е. Андрианов, А.Г. Аверкиев, Л.Д. Берман, А.Ф. Володин, В.А. Гладков, А.А. Гоголин, Б.В. Проскуряков, Б.С. Фарфоровский, Т.С. Ямпольский и др.

В руководстве по расчету зданий и сооружений на действие ветра ЦНИИСК им. Кучеренко регламентирован порядок сбора ветровой нагрузки на башенные металлические градирни. Указаны аэродинамические коэффициенты для круглого сечения градирни подобно резервуарам и дымовым трубам, что в свою очередь не совсем корректно. Приведены коэффициенты давления для шероховатых оболочек, имеющих формы гиперболоида, что применимо только для железобетонных гиперболических градирен.

Вопросам проектирования и оценки ветрового воздействия на башенные градирни посвящены работы ведущих зарубежных ученых как: С.R. Alimchandani, J. Armitt, Babu G. Ramesh, P.C. Bamu, K.Y. Bao, S.C. Blue, G. Chen, X.X. Cheng, N.P. Cheremisinoff, A. Diaconita, G.C. Dong, L. Du, M. Goudarzi, M. Izadi, M.M. Jia, S.T. Ke, H.D. Koepper, L. Kollár, C.L. Kumar, B.E. Launder, G. Li, H. Liu, H. Ma, G. Murali, H.J. Niemann, J. Noorzaei, H. Ruscheweyh, L. Shi, T. Sun, T. Tschanz, A. G. Davenport, H. Wang, Z. Waszczyszyn, Q. Wei, J. Wu, N. Xu, M. Yu, W. Zahlten, J.F. Zhang, L. Zhao, X. Zhou, X.L. Zhu, Y.F. Zou.

В работах ученых рассмотрены надежность башенных градирен, алгоритмы поиска оптимальных конструктивных решений башен, статическое поведение и устойчивость решетчатой оболочки гиперболической градирни.

Проведение исследований по данным направлениям невозможно без учета ветрового воздействия. В своих работах ученые особое внимание уделяют аэродинамическим характеристикам данных объектов.

Отдельно стоит отметить работы китайских ученых Нанкинского университета аэронавтики и астронавтики и Государственной ключевой лаборатории по уменьшению опасности бедствий в гражданском строительстве, Университета Тунцзи, Шанхай (S.T. Ke, L.Y. Du, Y.J. Ge, L. Zhao, Y. Tamura, Q. Yang, H. Wang, S.L. Chen, P. Zhu, D. Liu, Z. Ma, L. Xu). Коллектив авторов занимается экспериментальными и численными исследованиями, сбором и обработкой статистических данных на сверхбольших железобетонных и металлических башенных градирнях высотой свыше 180 м.

Ученые Китая исследуют как железобетонные, так и металлические каркасно-обшивные градирни. Анализ международной научной базы Scopus за последние 10 лет показывает, что 70% исследований связанно с башенными сверхбольшими гиперболическими градирнями и 30% связанно с башенными

сверхбольшими каркасно-обшивными металлическими градирнями. Полученные результаты исследований по сверхбольшим градирням не применимы к башенным градирням высотой до 100 м, так как данные градирни воспринимают в основном нестационарную часть профиля набегающего ветрового потока. В связи с этим результаты будут значительно отличаться. Градирни высотой до 100 м преобладают в количественном отношении в странах бывшего СНГ.

В разделе на основании выполненного критического анализа сформулированы цели, задачи и методы исследования, используемые в работе.

**Во втором разделе** выполнен анализ существующих методик физического и численного моделирования процессов обтекания сооружения ветровым потоком. Приведено обоснование возможности использования выбранных автором методов для проведения экспериментальных и численных исследований, а также нахождения и верификации эпюр ветрового давления.

Модельные экспериментальные исследования аэродинамических свойств выполнены в метеорологической аэродинамической трубе МАТ-1, разработанной в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДОННАСА). Характеристики МАТ-1 приведены на рисунке 1: рабочая часть закрытого типа - длина 4,8 м; ширина 1,0 м; высота 0,7 м; диаметр поворотного круга 0,9 м; максимальная скорость потока 20 м/с; 1 вентилятор мощностью 8 кВт, 220 В.

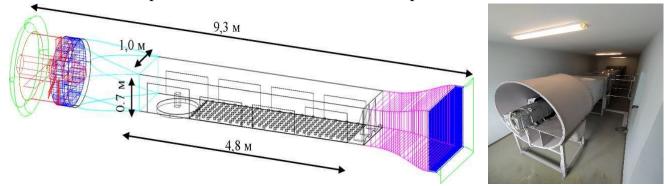


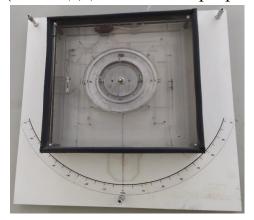
Рисунок 1- Метеорологическая аэродинамическая труба МАТ-1

Для постановки масштабных экспериментальных исследований в аэродинамической трубе рассмотрены критерии подобия: геометрического масштаба (Mi), числа Рейнольдса (Re), Маха (M), Струхаля (Sh), Фруда (Fr). При постановке и выполнении аэродинамических исследований достижение соответствия всем критериям подобия практически невозможно. В обычной практике ученые вынуждены прибегать к условной автомодельности, что подразумевает независимость коэффициента ветрового давления  $Cp_i$  от числа Рейнольдса.

Выполнен тензометрический весовой эксперимент с помощью тензометрических трехкомпонентных весов, разработанных соискателем Махинько А.В. на базе ДОННАСА, (рисунок 2).

Данный эксперимент позволяет найти коэффициент полного давления  $Cx,Cy,C_{Mz}$ . На первоначальном этапе эксперимента полученные данные по продувкам модели на различных скоростях позволили проанализировать на какой скорости набегающего потока достигается критерий подобия (автомодельность). Данным методом проанализировано выполнение критерия подобия по числу Рейнольдса (рисунок 3).

Для оценки влияния ветрового потока на отдельно стоящие башенные металлические градирни с учетом формообразования и стадийности возведения данных сооружений и последующего выявления зависимостей, разработана программа модельных экспериментальных исследований в лаборатории строительной аэродинамики в метеорологической аэродинамической трубе (МАТ-1) ДОННАСА. Программа включает в себя четыре вида экспериментов:



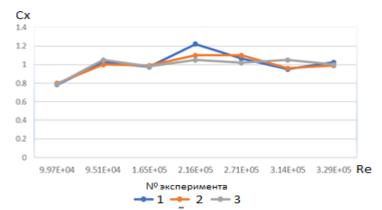


Рисунок 2 - Тензометрические трехкомпонентные весы

Рисунок 3 - Экспериментальная зависимость Cx=f(Re)

- А) Количественные эксперименты:
- тензометрические исследования позволяет выявить диапазон скоростей набегающего ветрового потока, при котором достигается критерий подобия по числу Рейнольдса;
- дренажные исследования позволяют получить значения локальных аэродинамических коэффициентов, по которым строится эпюра распределения ветрового давления.
- Б) Визуализационные эксперименты позволяют оценить характер обтекания ветрового потока, что в свою очередь сокращает выборку теорий, по которой проводится численные исследования:
  - теневой метод лазерного ножа (применяется впервые в МАТ-1);
  - метод шелковинок.

При проведении всех исследований моделировались четыре конструктивные формы башенных градирен: три пирамидальные формы с количеством граней восемь (рисунок 4); десять (рисунок 5); двенадцать (рисунок 6) и одна гиперболической формы в двенадцать граней (рисунок 7). Все модели

имеют одинаковую высоту и диаметры основания и горловины. Модели выполнены сборно-разборными для исследования влияния ветрового воздействия в процессе возведения и эксплуатации данных сооружений в зимний и летний период времени. Стадийность возведения разделена на пять этапов в соответствии с ярусностью карт возводимых сооружений и замыканием контура яруса. Карты монтируются с обшивкой. Данный метод является наиболее распространённым и технологичным при возведении БМГ. Масштаб моделей выбран в зависимости от размеров пограничного слоя с соблюдением геометрического подобия и учета характеристик площади поперечного сечения аэродинамической трубы МАТ-1.

Модели соответствуют натурным конструкциям реальных объектов исследования и выполнены с помощью 3D печати. В последующем цифровые модели, по которым производилась 3D печать, использованы в численных исследованиях, что позволяет избежать погрешностей при проведении верификации численных и экспериментальных исследований.



Рисунок 4 - Модельный ряд восьмигранной градирни с учетом монтажных стадий

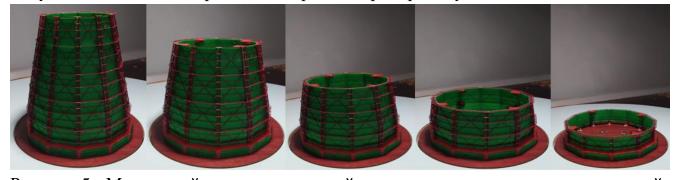


Рисунок 5 - Модельный ряд десятигранной градирни с учетом монтажных стадий

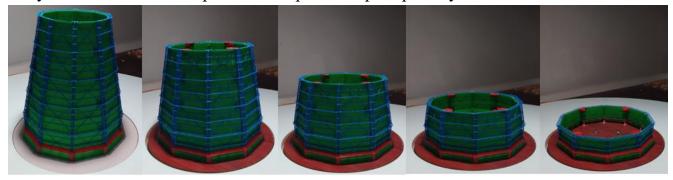


Рисунок 6 - Модельный ряд двенадцатигранной градирни с учетом монтажных сталий

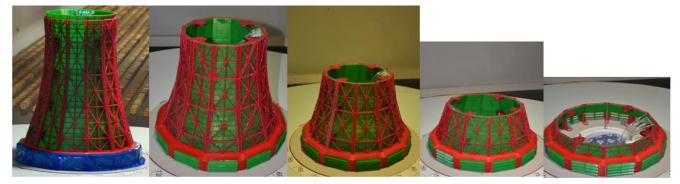


Рисунок 7 - Модельный ряд двенадцатигранной гиперболической градирни с учетом монтажных стадий

Выполнен анализ программных комплексов для проведения численных исследований обтекания ветровым потоком моделей башенных металлических каркасно-обшивных градирен.

Выполнено предварительное численное исследование в программном комплексе Solidworks flow simulation для выявления особенностей обтекания моделей (рисунок 8) ветровым потоком. Исходя из распределения давлений на поверхности исследуемых моделей принято решение расстановки датчиков пониженного давления в местах сопряжения карт ярусов, что позволит получить экспериментальные значения распределения Ср на этапе строительства и эксплуатации.

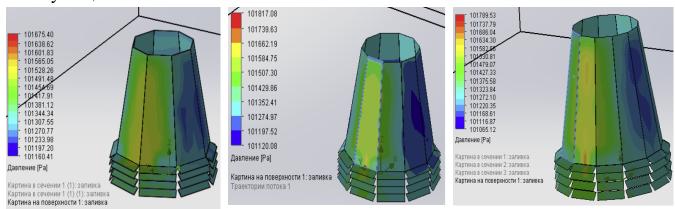


Рисунок 8 - Предварительные численные исследования распределения ветрового давления по поверхности восьми, десяти, двенадцатигранной модели башенной градирни.

В данном разделе выполнено обоснование программы и методики экспериментальных исследований. На основе экспериментальной верификации с известными коэффициентами полного давления Сх для моделей БМГ получена сходимость результатов с данными СП 20.13330.2016 в диапазоне 95-100%. Выявлен диапазон скоростей от восьми до шестнадцати м/с при котором выполняется критерий подобия (автомодельность). Принята рабочая скорость потока в аэродинамической трубе МАТ-1 ГОУ ВПО «ДОННАСА» V=10 м/с, что составляет Re=2.71x10<sup>5</sup>.

Разработана выборка испытуемых моделей с учетом сезонной работы башенных металлических градирен площадью орошения до 1600 м<sup>2</sup> и последовательности возведения. Выборка охватывает четыре конструктивные формы каждая из которых разделяется на пять стадий возведения и две стадии эксплуатации. Каждая из стадий испытывается при набегании ветрового потока на грань и ребро, что в общем требует выполнения 56 экспериментальных испытаний для выявления полной картины распределения ветрового воздействия. На основе численного анализа выполнена расстановка датчиков пониженного давления с учетом последовательности возведения.

В третьем разделе приведены результаты выполненных модельных экспериментальных исследований в лаборатории строительной аэродинамики «ДОННАСА». Выполнены экспериментальные исследования нахождения локальных аэродинамических коэффициентов Ср. В модели, представленной на рисунке 9, датчики установлены по шесть штук в места сопряжения карт градирни. Общее количество датчиков на грань составило 30 шт. Для получения полной картины набора локальных коэффициентов эксперимент повторяется с поворотом модели от 0 до 180 градусов в связи с тем, что данное сооружение симметрично.

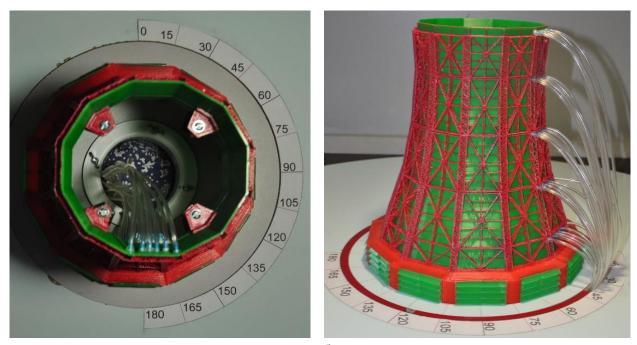


Рисунок 9 - Дренированная модель башенной металлической градирни

На рисунке 10 приведена одна из полученных эпюр ветрового воздействия по сечениям, методом дренирования модели. На рисунке 11 приведена интерполирования визуализация наиболее опасной расчетной ситуации набегания ветрового потока для гиперболической двенадцатигранной модели башенной каркасно-обшивной металлической градирни.



Рисунок 10 - Экспериментальные данные распределения локальных коэффициентов Ср

Рисунок 11 - Интерполированная визуализация расчетной ситуации набегания ветрового потока.

Имея полное давление относительно осей и набор локальных давлений, проведя интегрирование и аппроксимацию полученных данных, следует выполнить верификацию с численной моделью. Для правильности выбора теории обтекания в численной модели необходимо оценить характер течения ветрового потока вблизи модели.

Для оценки характера течения ветрового потока вблизи модели и выбора теории обтекания тела, выполнено экспериментальное исследование методом велосиметрии или теневым методом, результаты которого приведены на рисунках 12-15.

Данным методом определялся характер обтекания башенной металлической гиперболической градирни. На рис. 12 приведено обтекание ветровым потоком градирни относительно плоскости XOZ с образованием малого вихря за моделью. На рисунке 13 также приведено обтекание относительно плоскости XOZ, но в данном случае анализируется сама работа данного сооружения, так как у горловины трубы образуется повышенное разряжение, происходит подсос дыма через нижние окна башни. На рисунке 14 приведена визуализация ветрового потока относительно плоскости XOY, где отчетливо видно образование большого вихря позади модели.

На рисунке 15 приведена визуализация потока относительно XOY, но съемка выполнена со стороны, где отчетливо наблюдается сход малого вихря. При данном анализе и покадровом просмотре видео с частотой кадров 240 к/сек выявлены поочередные сходы малых вихрей в количестве 3 шт., а затем

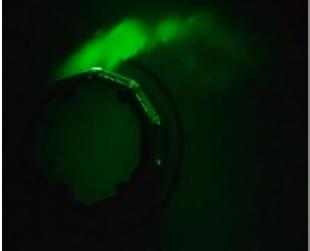
образовании большого вихря позади объекта. Исходя из анализа характера обтекания башенной металлической градирни, при расчете численным методом применима теория малых вихрей и теория больших вихрей. В дальнейшем в численном эксперименте анализируется вклад в нагрузку образования больших и малых вихрей.

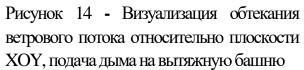


ХОΖ, подача дыма на вытяжную башню



Рисунок 12 - Визуализация обтекания Рисунок 13 - Визуализация обтекания ветрового ветрового потока относительно плоскости потока относительно плоскости ХОZ, подача дыма по низу башни





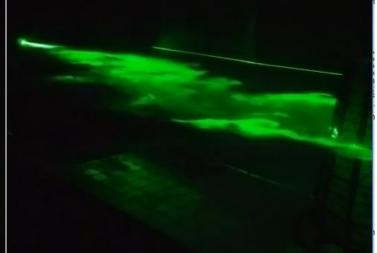


Рисунок 14 - Визуализация обтекания Рисунок 15 - Визуализация обтекания ветрового ветрового потока относительно плоскости потока изометрия, подача дыма на вытяжную башню

Также при визуализации ветрового потока использован метод шелковинок, приведенный на рисунках 16,17. Данный метод позволил оценить характер течения вокруг модели, амплитуду больших вихрей и направление закручивания вихрей.

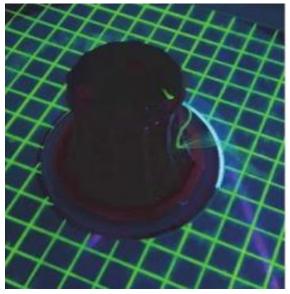




Рисунок 16 - Метод шелковинки с Рисунок 17 - Метод шелковинки с применением люминесцентной нити и применением нитей без учета градуированной специально разработанной градуированной сети.

В данном разделе представлены полученные экспериментальные данные распределения локальных аэродинамических коэффициентов на модельный ряд башенных металлических каркасно-обшивных градирен, не представленных в нормативных документах с учетом эксплуатации сооружения в зимний и летний период времени и этапов возведения. Полученные экспериментальные данные значений и распределения аэродинамических коэффициентов отличаются от предлагаемых в нормативных документах пиковыми значениями при активном давлении от 30% до 50%, протяженностью области и местами с отрицательными давлениями возникающей при сходе вихря.

В четвертом разделе приведены результаты исследований обтекания ветровым потоком каркасно-обшивных башенных градирен, полученные с использованием численного метода конечных объемов. На рисунках 18, 20 показано рассеивание турбулентной энергии в плоскости при обтекании гиперболической Для двенадцатигранной модели. оценки рассеивания энергии, полученные результаты турбулентной численных исследований сопоставлялись c экспериментальными данными, полученными методом лазерного ножа (рисунки 19, 21).

Полученные численным методом распределения локальных аэродинамических коэффициентов, (рисунок 22), сопоставлены с экспериментальными данными (рисунок 23), полученными в лаборатории строительной аэродинамики «ДОННАСА». При проведении верификации полученных численных и экспериментальных данных моделей получена

допустимая сходимость в заданных точках, которая колеблется от 85 до 95 %.

Эксперимент подтвердил эффективность применения метода лазерного ножа в подборе теории, которая лежит в основе численного моделирования расчета и характеристической оценки рассеивания турбулентной энергии, направления течения ветрового потока, характера обтекания моделей.

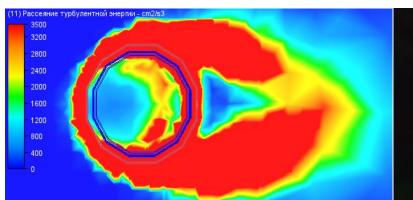


Рисунок 18 - Рассеивание турбулентной энергии модель, двенадцатигранной гиперболической градирни плоскость XOY

Рисунок 19 - Визуализация обтекания двенадцатигранной гиперболической градирни плоскость XOY

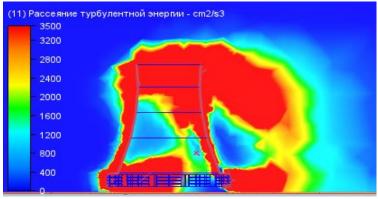


Рисунок 20 - Рассеивание турбулентной энергии, модель двенадцатигранной гиперболической градирни плоскость XOZ

Рисунок 21 - Визуализация обтекания двенадцатигранной гиперболической градирни плоскость XOZ





Рисунок 22 - График распределения коэффициентов давления Ср яруса четыре, двенадцатигранной гиперболической градирни.

Рисунок 23 - Экспериментальные данные распределения локальных коэффициентов Cp.

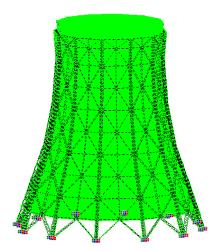
Для анализа влияния полученной нагрузки учетом c изменения протяженности области и места с отрицательным давлением, возникающей при сходе вихря, построены численные модели для оценки влияния на НДС БМГ методом конечных элементов (рисунки 24, 25) с учетом конструктивной формы и этапов возведения.

Путем проведенных расчетов конечно-элементным методом, выявлены расчетные сочетания нагрузок, с вносящим значительный вклад в работу сооружения.

Основным результатом, изложенным в данном разделе, стал разработанный методический подход применения метода конечных объемов, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком башенных металлических градирен, основные этапы которого заключаются в определении:

- размеров расчетной области;
- величины ячеек расчетной области;
- расчетного значения скорости по методике национальных норм;
- теоретической основы для проведения расчета;
- значение интенсивности турбулентности;
- критериев сходимости расчетного процесса.

Верификацию модельного ряда экспериментальных моделей предложенным методологическим подходом обеспечивает сходимость в пределах от 85% до 90%.





градирни ПК ЛИРА-САПР 2022.

Рисунок 24 - Численная конечно-элементная Рисунок 25 - Численная конечно-элементная модель двенадцатигранной гиперболической модель двенадцатигранной пирамидальной градирни ПК ЛИРА-САПР 2022.

Конечно-элементным методом определено что:

- при проектировании башенных металлических градирен следует учитывать воздействие ветра как на грань, так и на ребро сооружения. При учете ветрового воздействия на ребро, наиболее нагруженными элементами градирни являются колонны и связи, а при учете ветрового воздействия на грань в данной ситуации наиболее нагруженными элементами являются прогоны крепления обшивки;

- при анализе ветрового воздействия на этапах возведения наиболее существенный вклад ветровой нагрузки выявлен на этапе замыкания карт 4 яруса. Показатель аэродинамического коэффициента на данной монтажной стадии выше на 30% по отношению к стадии эксплуатации.

**В пятом разделе** приведены рекомендации по применению полученных обобщенных систематизированных результатов нагрузок, полученных численным и экспериментальными методами исследования с учетом особенностей конструктивной формы и этапов жизненного цикла градирен промышленных предприятий.

В рекомендациях рассматриваются этапность построения численных моделей для нахождения ветрового воздействия на испытуемые модели методом конечных объемов.

Приведены этапы построения численной модели для расчета башенных каркасно-обшивных градирен методом конечных элементов. Рассмотрены особенности приложения ветровой нагрузки на разработанные численные модели.

Приведено графическое исполнение (рисунок 26) и аппроксимирующие выражения (таблица 1) огибающих эпюр ветрового воздействия с учетом сезонности работы башенных каркасно-обшивных градирен и последовательности возведения.

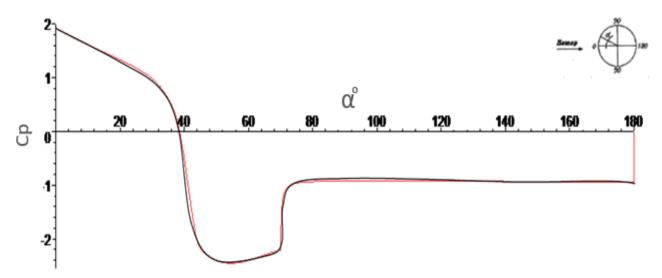


Рисунок 26 - Аппроксимационная зависимость полученных верифицированных данных для гиперболической двенадцатигранной градирни набегание ветрового потока на грань:

---- Полученные верифицированные данные;

---- Аппроксимированная зависимость сплайном из рациональных и дробно рациональных функций.

Таблица 1 - Численное нахождение аэродинамического коэффициента Ср по полученным огибающим эпюрам для гиперболической двенадцатигранной градирни набегание ветрового потока на грань.

Угол, град.	Формула
0≤x≤35	$C_{pi} = \frac{131.034x - 4948}{x^2 + 21.18x - 2572}$
35 <x≤45< th=""><th><math display="block">C_{pi} = \frac{-15.966x + 615.642}{x^2 - 84.821x + 1839}</math></th></x≤45<>	$C_{pi} = \frac{-15.966x + 615.642}{x^2 - 84.821x + 1839}$
45 <x≤70< th=""><th><math>C_{pi} = -7.196 \times 10^{-5} x^3 + 0.0138 x^2 - 0.871 x + 15.556</math></th></x≤70<>	$C_{pi} = -7.196 \times 10^{-5} x^3 + 0.0138 x^2 - 0.871 x + 15.556$
70 <x≤180< th=""><th><math display="block">C_{pi} = \frac{0.84x - 58.267}{4.562 \times 10^{-4} x^2 - x + 67.529}</math></th></x≤180<>	$C_{pi} = \frac{0.84x - 58.267}{4.562 \times 10^{-4} x^2 - x + 67.529}$

Рассмотрены расчетные сочетания нагрузок с учетом этапности возведения.

#### ВЫВОДЫ

В результате численных и экспериментальных исследований достигнута основная цель работы, заключающаяся в уточнении значений ветровых нагрузок на башенные металлические градирни на основе изучения закономерностей влияния давления ветрового потока с учетом конструктивной формы градирен, в результате аэродинамических испытаний, и численных исследований ветрового давления. Выполнена разработка рекомендации по определению ветровой нагрузки с учетом особенностей конструктивной формы градирен и процесса их возведения. На основе выполненных экспериментальных и численных исследований получены следующие основные результаты:

- 1. С использованием верификации данных для расчетных моделей по известным параметрам полного ветрового давления методами физического и моделирования обоснованы программы методики ПО экспериментальных численных исследований уточнению И величин аэродинамических коэффициентов для конструктивных форм и этапов возведения башенных металлических каркасно-обшивных градирен площадью орошения до  $1600 \text{ m}^2$ .
- 2. Данные экспериментальных исследований ветрового воздействия на модели металлических каркасно-обшивных башенных градирен в лаборатории строительной аэродинамики ГОУ ВПО «ДОННАСА» позволили установить:
- Значения коэффициентов полного ветрового давления Cx, Cy,  $C_{Mz}$ , подтверждающие высокую сходимость экспериментальных данных в пределах от

95% до 100% со СП20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» для сооружений пирамидальной формы.

- Значения критериев подобия при исследовании ветрового воздействия на башенные каркасно-обшивные градирни, при этом выявлена независимость аэродинамического коэффициента Ср от числа Рейнольдса Re в пределах от  $2.71 \times 10^5$  до  $3.29 \times 10^5$ .
- Значения и характер распределения локальных аэродинамических коэффициентов Ср для конструктивных форм башенных каркасно-обшивных металлических градирен, не регламентированных в нормативных документах с учетом монтажных стадий.
- Значения и характер распределения локальных аэродинамических коэффициентов Ср отличаются от предлагаемых в нормативных документах пиковых значений при активном давлении от 30% до 50%, протяженностью области и зон с отрицательными давлениями, возникающими при сходе вихря.
- Распределение локальных аэродинамических коэффициентов Ср с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения башенных каркасно-обшивных градирен.
- 3. Выполнены численные исследования ветрового воздействия для различных конструктивных форм БМГ с учетом этапов возведения в программном комплекса Autodesk CFD, что позволило:
- верифицировать экспериментальные данные, полученные в метеорологической аэродинамической трубе MAT-1;
- верифицировать создание установки для визуализации обтекания испытуемых моделей ветровым потоком методом лазерного ножа, позволяющим оценить характер обтекания моделей и реализовать выбор наиболее подходящей теории расчета обтекания данного вида сооружений;
- провести выбор и обоснование теории Reynolds Averaged Navier-Stokes SST k-ω DES расчета, наиболее точно описывающего характер обтекания расчетных моделей ветровым потоком.
- 4. На основании обобщения и систематизации численных и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по применению полученных ветровых нагрузок на каркасно-обшивные башенные металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и процесса возведения, отличающиеся от ранее применяемых:
- возможностью нормирования ветровой нагрузки для БМГ с учетом этапов возведения;
- возможностью нормирования ветровой нагрузки для БМГ с учетом сезонной работы сооружения.

- 5. Результаты исследований внедрены:
- в ООО «Научно-производственное предприятие «ДОНТЕХЭКСПЕРТ», г. Донецк, для составления программы обследования и оценки остаточного ресурса и эксплуатационной пригодности башенной градирни №4 цеха улавливания химических продуктов коксования филиала №6 «Ясиновский коксохимический завод»». Работа выполнялась по договору №666\_50 от 09.09.2019 г;
- в ООО «ГПК ИНЖИНИРИНГ», г. Донецк, результаты диссертационной работы приняты для проектирования металлических башенных каркасно-обшивных градирен;
- в учебный процесс в качестве учебного материала по таким дисциплинам: Б1.В.06 «Металлические конструкции» (для направления подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль «Промышленное и гражданское строительство») Б1.В.ДВ.01.02 «Особенности расчета, проектирования эксплуатации уникальных зданий и сооружений» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и проектирование зданий и сооружений Б1.В.03 «Технология и организация реконструкции и ремонтно-08.04.01 восстановительных работ» (для направления подготовки «Теория «Строительство», программа практика организационно-И технологических и экономических решений»); Б1.В.ДВ.04.01 «Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и практика организационнотехнологических и экономических решений»,), что отображено в учебных планах и рабочих программах дисциплин (модулей).

# ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

- 1. Югов, А. М. Оценка влияния ветрового воздействия на незамкнутый контур яруса башенной металлической градирни на отм. 44 м / А. М. Югов, С. О. Титков. А. В. Ихно. Текст: непосредственный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научно-технические достижения студентов строительной-архитектурной отрасли: Т. 1. Современная строительная наука и инженерия: Сб. науч. тр. Макеевка: ДОННАСА, 2018. Выпуск 2018-4(132). С. 55-58. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://donnasa.ru/publish\_house/journals/vestnik/2018/vestnik\_2018-4(132)\_tom\_1.pdf (Приведен предварительный расчет влияния ветрового воздействия на незамкнутый контур яруса башенной металлической градирни для последующего обоснования расстановки датчиков пониженного давления и проведения экспериментальных исследований методом дренирования модели).
- 2. Югов, А. М. Оценка влияния формообразования башенной металлической градирни на восприятие ветровых нагрузок / А. М. Югов, **С. О. Титков.** В. М. Анищенков. Текст: непосредственный // Металлические конструкции. 2018. –

- Т. 24, № 1. С. 41–48. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://donnasa.ru/publish\_house/journals/mk/2018-/04\_yugov\_titkov\_anishchenkov.pdf (Приведен предварительный расчет влияния ветрового воздействия на башенную металлическую градирню для последующего обоснования расстановки датчиков пониженного давления и проведения экспериментальных исследований методом дренирования модели).
- 3. Югов, А. М. Исследование температурных полей, возникающих при эксплуатации башенной металлической градирни в зимний период времени / А. М. Югов, С. О. Титков. Текст: непосредственный // Металлические конструкции. 2020. Т. 26, № 1. С. 15—24. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://donnasa.ru/publish\_house/journals/mk/2020-1/02\_yugov\_titkov.pdf (Даны результаты статистической выборки распределения температурных полей, полученных непосредственно на объекте исследования в зимний период времени.)
- 4. **Титков С.О.** Физическое моделирование и анализ влияния обтекания ветровым потоком отдельно стоящей башенной металлической градирни / С. О. Титков, А. М. Югов, В. Н. Васылев, Э. А. Лозинский. Текст: непосредственный // Металлические конструкции. 2021. Т. 27, № 2. С. 83–96. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://donnasa.ru/publish\_house/journals/mk/2021-2/03\_titkov\_yugov\_vasylev\_lozinsky.pdf (Даны результаты физического моделирования обтекания ветровым потоком отдельно стоящей башенной металлической градирни.)
- 5. Титков С.О. Экспериментальное исследование ветрового воздействия на башенную гиперболическую градирню в аэродинамической трубе с учетом монтажных стадий / С. О. Титков, А. М. Югов, В. Н. Васылев, Э. А. Лозинский. – Текст: непосредственный // Металлические конструкции. -2021. - Т. 27, № 4. - С. 197–215. [Электронный pecypc]. Режим доступа: http://donnasa.ru/publish\_house/journals/mk/2021-4/02\_titkov\_yugov\_vasylev\_lozinskiy.pdf (Приведены результаты исследований ветрового экспериментальных воздействия башенную гиперболическую градирню с учетом монтажных стадий.).

## **АННОТАЦИЯ**

Титков Сергей Олегович. **Уточнение ветровой нагрузки на башенные** металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения. — ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». — Макеевка, 2022 г.

Диссертация посвящена разработке уточненной методики нормирования ветровой нагрузки с учетом особенностей конструктивной формы и процесса

возведения на основании детальных исследований моделей объекта в аэродинамической трубе и сравнительного численного анализа.

В введении изложена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первом разделе** анализируется состояние вопроса. Рассмотрены особенности конструктивных форм башенных каркасно-обшивных металлических градирен. Выполнен критический анализ нормативной базы и литературных источников.

**Во втором разделе** приведено обоснование возможности использования выбранных автором методик выполнения численных и экспериментальных исследований для нахождения и верификации распределения эпюр ветрового воздействия.

**В третьем разделе** приведены результаты выполненных модельных экспериментальных исследований в лаборатории строительной аэродинамики «ДОННАСА». Определены локальные аэродинамические коэффициенты Ср и характер их распределения по поверхности моделей с учетом конструктивной формы и этапов возведения сооружения. Выполнена визуализация обтекания моделей ветровым потоком.

В четвертом разделе представлены результаты численных исследований обтекания и распределения эпюр ветрового воздействия средствам Computational Fluid **Dynamics** моделирования. Выполнена верификация экспериментальных и численных аэродинамических исследований. Получены эпюры распределения ветрового воздействия на башенные каркасно-обшивные градирни с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения. Приведены результаты численных исследований методом конечных элементов с последующим анализом влияния на НДС от полученных ветровых нагрузок.

**В пятом разделе** приведены рекомендации по применению полученных ветровых нагрузок с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения башенных металлических каркасно-обшивных градирен.

**Ключевые слова**: ветровая нагрузка, башенные каркасно-обшивные металлические градирни, последовательность возведения, визуализация, тензометрические весы, пространственная модель, локальные аэродинамические коэффициенты, напряженно-деформированное состояние.

#### **ABSTRACT**

Titkov Sergey. Refinement of the wind load on tower metal cooling towers, taking into account the features of the structural form and stages of construction. - Manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.23.01 - Building structures, buildings and structures. – SEI HPE "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture". – Makeevka, 2022

The dissertation is devoted to the development of a refined method for normalizing the wind load, taking into account the features of the structural form and the construction process, based on detailed studies of object models in a wind tunnel and comparative numerical analysis.

The introduction describes the general characteristics of the work, substantiates the relevance of the topic, formulates the goals and objectives of the research, presents the object and subject of the study, formulates the scientific novelty and practical value of the results of the work.

The first section analyzes the state of the issue. The features of the structural forms of tower frame-sheathed metal cooling towers are considered. A critical analysis of the regulatory framework and literary sources is carried out.

The second section substantiates the possibility of using the methods chosen by the author for performing numerical and experimental studies to find and verify the distribution of wind action diagrams.

The third section presents the results of model experimental studies performed in the laboratory of structural aerodynamics "DONNAS". The local aerodynamic coefficients Cp and the nature of their distribution over the surface of the models are determined, taking into account the structural form and stages of construction of the structure. A visualization of the wind flow around the models was performed.

The fourth section presents the results of numerical studies of the flow around and the distribution of wind action diagrams using the Computational Fluid Dynamics modeling tools. Verification of experimental and numerical aerodynamic studies has been carried out. Diagrams of the distribution of wind action on tower frame-sheathed cooling towers are obtained, taking into account the features of the structural form and stages of construction. The results of numerical studies by the finite element method are presented, followed by an analysis of the effect on SSS from the obtained wind loads.

The fifth section provides recommendations on the application of the obtained wind loads, taking into account the features of the structural form and the stages of erection of tower metal frame-sheathed cooling towers.

**Key words:** wind load, frame-sheathed metal cooling towers, erection sequence, visualization, tensometric scales, spatial model, local aerodynamic coefficients, stress-strain state.