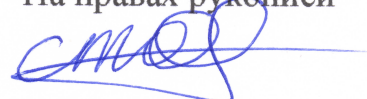


Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи



ТИТКОВ СЕРГЕЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК А (043.5) + 624.97

Т 45

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

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

диссертация на соискание научной степени кандидата
технических наук



Научный руководитель

ЮГОВ Анатолий Михайлович

доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров диссертации заверяю:

ученый секретарь

специализированного ученого совета Д 01.006.02



Лахтарина С.В.

Макеевка – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ I. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ, НОРМИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА КОНСТРУКЦИИ БАШЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАДИРЕН.....	13
1.1 Особенности конструктивных форм башенных каркасно-обшивных металлических градирен.....	13
1.2 Критический обзор нормативной базы и литературных источников.....	18
1.3 Численные методы исследования ветрового воздействия и их реализация в современных программных комплексах.....	28
1.4 Методы экспериментальных исследований ветрового воздействия и их реализация.....	31
1.5 Цели и задачи исследования.....	32
РАЗДЕЛ II. МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБТЕКАНИЯ СООРУЖЕНИЯ ВЕТРОВЫМ ПОТОКОМ.....	35
2.1 Критерий подобия физического моделирования.....	35
2.2 Аэродинамическая труба МАТ-1.....	37
2.3 Планетарный пограничный слой атмосферы.....	40
2.4 Распределение скорости масштаба турбулентности в рабочем канале МАТ-1.....	42
2.5 Система сбора и обработки данных.....	44
2.6 Методы численного исследования обтекания сооружений ветровым потоком.....	45
2.7 Программа проведения модельных экспериментальных исследований в МАТ-1.....	47
2.7.1 Программа тензометрических весов исследований.....	52
2.7.2 Программа проведения дренажных экспериментальных исследований.....	54
2.7.3 Программа проведения визуализации ветрового потока.....	56
2.8 Методика расчета ветровых воздействий на сооружения, и комплексы на основе численного решения.....	58
2.8.1 Выбор базового программного обеспечения.....	59
2.8.2 Выбор обоснованной верификационной задачи.....	59
2.9 Выводы по разделу 2.....	60

РАЗДЕЛ III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОБТЕКАНИЯ БМГ ВЕТРОВЫМ ПОТОКОМ.....	61
3.1 Анализ влияния ветрового потока на башенную двенадцатигранную градирию гиперболической формы.....	61
3.2 Анализ влияния ветрового потока на башенную двенадцатигранную градирию пирамидальной формы.....	67
3.3 Анализ влияния ветрового потока на башенную десятигранную градирию пирамидальной формы.....	74
3.4 Анализ влияния ветрового потока на башенную восьмигранную градирию пирамидальной формы.....	80
3.5 Выводы по разделу 3.....	85
РАЗДЕЛ IV. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА БАШЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГРАДИРНИ.....	86
4.1 Численный анализ влияния ветрового воздействия на различные формы БМГ. 86	
4.2 Исследование распределения температурных полей и технологической наледи в процессе эксплуатации БМГ.....	93
4.3 Численный анализ влияния полученных эпюр ветрового давления на НДС БМГ.....	97
4.4 Выводы по разделу 4.....	99
РАЗДЕЛ V. УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА БАШЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГРАДИРНИ.....	101
5.1 Рекомендации по расчету БМГ площадью орошения 1600м ² конечно-элементным методом.....	101
5.2 Уточненная методика нормирования ветровой нагрузки БМГ гиперболической формы площадью орошения 1600м ²	102
5.3 Уточненная методика нормирования ветровой нагрузки БМГ пирамидальной формы площадью орошения 1600м ²	104
5.4 Выводы по главе 5.....	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А.(Справка о внедрении).....	128

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Справка о внедрении в учебный процесс).....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ В (Экспериментальные данные локальных аэродинамических коэффициентов).....	131
Приложение Г.....	176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Обеспечение нормальной работы башенных металлических градирен (БМГ) как строительных конструкций обуславливается пятью особенностями: учетом всех нагрузок и воздействий и их сочетаний, созданием достоверной математической модели, изготовлением, транспортировкой, монтажу и эксплуатации.

На сегодняшний день существует ряд проблем для выполнения качественных проектов башенных каркасно-обшивных градирен, основной проблемой является отсутствие нормативной базы описывающей нагрузки и воздействия на данное сооружение. Современное программное обеспечение, в котором проектировщики производят расчеты, позволяет выполнять математические модели любой сложности на всех этапах жизненного цикла сооружения с приложением различного рода нагрузок и воздействий. Отсутствие нормативной базы основных нагрузок, для данного вида сооружения, является основной проблемой для реализации качественных проектов создание которой является главной задачей ученых в этой области. Изготовление монтаж конструкций БМГ – сложный и трудоёмкий процесс, который в последующем так же вносит определенный вклад в работу сооружения. В последние годы на уникальных и сложных объектах применяется практика анализа напряженно деформированного состояния (НДС) на протяжении жизненного цикла сооружения. Жизненный цикл сооружения (ЖЦС) башенных металлических градирен состоит из проектирования, этапов строительства, эксплуатации, модернизирования, капитальный ремонт, снос. У данного сооружения период эксплуатации меняется в связи с сезонностью года и разделяется на летний и зимний период времени. При сезонной эксплуатации сооружения изменяются сочетания и влияющих на сооружения нагрузок, и воздействий. Но некоторые нагрузки все же остаются, такие как ветровое воздействие значение характера и интенсивности которого не оценивается в нормативной базе. Поэтому необходимо является определение основных нагрузок и воздействий, влияющих на напряженно-деформированное состояние

башенных каркасно-обшивных градирен с учетом многообразия конструктивных форм и процесса возведения и эксплуатации.

Из всех возможных нагрузок особое внимание занимает ветровая нагрузка и ее корректный учет при проектировании сооружений данного типа. Анализ отечественных и зарубежных нормативных документов, которые регламентируют определение ветровой нагрузки на башенные металлические градирни, указал на ряд существенных недостатков, особенно в вопросе определения характера распределения локальных аэродинамических коэффициентов по периметру сечения вытяжной башни и интенсивности распределения по высоте сооружения. 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 усовершенствовать методики проектирования металлических отдельно стоящих башенных градирен, значительно повысить качество проектирования, также положительно отразится на работе в условиях эксплуатации.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в рамках кафедральных научно-исследовательских работ:

- К2-13-16 «Инновационные энергоресурсосберегающие организационно-технологические процессы возведения и реконструкции зданий и сооружений» (гос. регистр. №0117D000268);
- К2-12-21 «Развитие конструктивных систем и организационно-технологических 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, A.G. Davenport, C.P.W. Geurts, A. Kareem.

Анализ отечественных и зарубежных норм по определению ветрового воздействия на здания и сооружения показывает, 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 сбора 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 гиперboloида, 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 1600м².

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 1600м² 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:

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. Разработан алгоритм автоматизированного расчета локальных аэродинамических коэффициентов C_p . Осуществлена разработка и изготовление уточненных физических моделей по средствам 3D печати и 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 достоверности результатов подтверждена данными экспериментальных исследований, которые выполнены с 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.

В полном объеме диссертация доложена на расширенном заседании кафедры технология и организация строительства ДОННАСА (29.11.2022 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором в пяти статьях в научных изданиях.

Общий объем публикаций – 2,59 п.л., из которых 1,49 п.л. принадлежат лично автору.

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.

РАЗДЕЛ I. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ, НОРМИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА КОНСТРУКЦИИ БАШЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАДИРЕН

1.1 Особенности конструктивных форм башенных каркасно-обшивных металлических градирен

Первая градирня была построена в 1918 году в Нидерландах, в городе Херлен на самом юге страны. Создателем гиперболической градирни был профессор машиностроения и директор голландских государственных шахт Фредерик ван Итерсон. Именно этому человеку удалось создать максимально технологичное и эффективное изобретение, которое он запатентовал тогда же, в 1918-м. Наглядно оценить промышленную архитектуру Европы и США можно познакомившись с работой фотографов Бернарда и Хиллари Бехер, которые собрали коллекцию снимков, состоящую из 236 фотографий не функционирующих объектов градирен 19 века. На рис. 1.1 представлен коллаж фотографий градирен промышленных предприятий, снятых Бехерами.

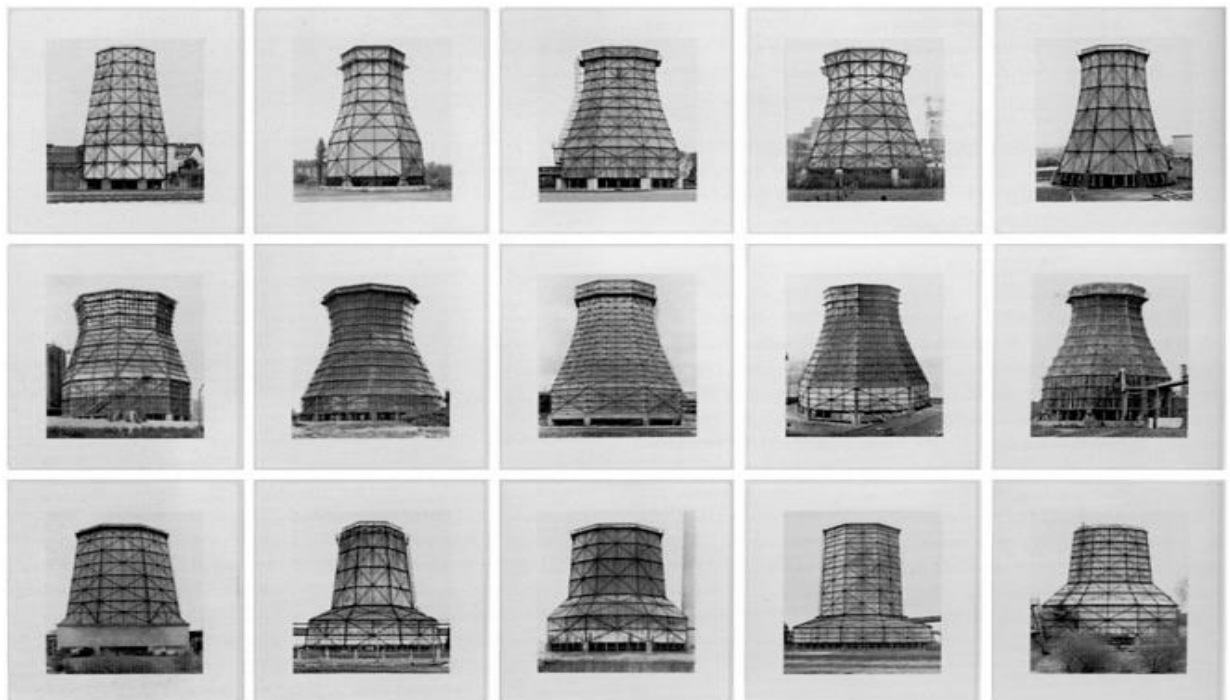


Рисунок 1.1 – Градирни промышленных предприятий Европы и США 19 века

Документально родиной градирен является Голландия. Проанализировав исторические факты отметим, что водяные башни существовали еще в 1771 году на территории Российской империи. В Старой Руссе по указу Екатерины II был основан солеваренный завод, на территории которого две градирни при помощи водяных насосов испаряли соль.

Несмотря на то, что отечественные теплоэлектростанции строились с 1914 года, первая станция с градирнями появилась в России лишь в 1922 году. Это была Каширская ГРЭС. Она располагается на берегу Оки и работает до сих пор. На ее территории функционирует 3 гиперболических градирни. Второй станцией с градирнями в Советском Союзе стала Новосибирская ТЭЦ-2. Правда, в то время она называлась Левобережная ГРЭС. К началу 1930-х годов Новосибирск стал ощущать дефицит энергии: электричество распределялось по строгому графику, запрещалось пользоваться электробытовыми приборами. Чтобы удовлетворить потребность развивающегося города в электроэнергии, в 1932 году на левом берегу реки Оки запустили Левобережную ГРЭС. С развитием советской, а после распада СССР уже российской энергетической системы в стране выросло количество станций с градирнями. Так, на сегодняшний день на территории России насчитывается примерно 370 действующих градирен ТЭЦ.

На территории Донецкой народной республики данные сооружения применяются в металлургической, коксохимической, энергетической промышленности. Современные градирни выполняются в виде двух основных форм. Это пирамидальная форма (рисунок 1.2) в основании которой лежит многоугольник от шести до двенадцати граней и гиперболоид (рисунок 1.3), имеющий в основании также многоугольник от двенадцати до двадцати четырех граней.

Большинство промышленных процессов и систем кондиционирования воздуха вырабатывают тепло, которое должно быть отведено и рассеяно. Обычно вода используется как передающая среда для отведения тепла от промышленных теплообменных аппаратов, конденсаторов холодильных машин и т.д.



Рисунок 1.2 – Башенная десятигранная металлическая градирня пирамидальной формы («Донецкий металлургический завод»)



Рисунок 1.3 – Башенная двенадцатигранная металлическая градирня гиперболической формы («Ясиновский коксохимический завод»)

В прошлом это достигалась путем непрерывной подачи воды из городских систем водоснабжения или из естественных источников воды, которая нагревалась по мере прохождения процесса теплообмена и сбрасывалась в канализацию или обратно в поверхностный источник воды.

Сейчас вода от коммунальных предприятий становится чрезмерно дорогой по причине постоянно растущего водопотребления и высокой стоимости очистки сточных вод. Аналогично и охлаждающая вода из естественных источников относительно недоступна в связи с нарушением экологической ситуации источников воды, вызванной сбросом воды с повышенной температурой.

С целью рассеивания теплоты напрямую в атмосферу могут применяться аппараты воздушного охлаждения, но покупная цена и расходы электроэнергии на привод вентиляторов этих устройств очень высоки.

Кроме перечисленных недостатков добавляется низкая эффективность охлаждения, данные аппараты могут обеспечить температуру охлажденной воды на 11°C выше за температуру воздуха по «сухому» термометру. Такие температуры охлаждающей воды слишком высоки для подавляющего большинства промышленных процессов.

Градирни позволяют преодолеть большинство из этих проблем, и являются широко применяемыми для рассеивания тепла от холодильных установок, систем кондиционирования и большинства промышленных процессов. Расходы оборотных систем с градирнями составляют только 5% от общего количества циркулирующей воды, что делает их наиболее дешевым решением для систем с покупным водоснабжением. Также значения величины продувки для систем с градирнями очень низкое, что значительно снижает воздействие на окружающую среду. И самое главное, градирни способны охладить воду до значения, которое всего на $2-3^{\circ}\text{C}$ превышает температуру воздуха по «влажному» термометру. Таким образом, температура воды после градирен может быть на 20°C ниже, чем на выходе из аппаратов воздушного охлаждения при сопоставимых габаритных размерах.

Градирия является неотъемлемой частью технологического цикла различных предприятий. Она, в свою очередь экономит водные ресурсы нашей страны, исходя из данных [1] таблицы 1.1 столбца 4, откуда следует что требуемый объем воды для отвода тепла на различных предприятия очень велик, с учетом того, что на некоторых предприятиях работа не останавливается на протяжении нескольких десятилетий.

Таблица 1.1 – Данные об использовании оборотной воды в промышленности и энергетике. [1]

Отрасль	Расход Воды на охлаждение в %	Водооборот %	Расход оборотной воды на крупных предприятиях, тыс. м ³ /ч	Температура воды °С		Вид загрязнений
				Нагретой в техническом оборудовании	Охлажденной на градирне	
1	2	3	4	5	6	7
Теплоэнергетическая	96	60	1000	37-45* ¹ 35-38* ² 35-40* ³	30-33 30-33 25-30	Условно чистая Тоже Нефтепродукты
Нефтеперерабатывающая	95	94	100	40-45	25-28	Механические примеси нефтепродукты
Химическая и нефтехимическая	74-95	64-96	100	40-45	30-35	Органические, минеральные примеси
Черная металлургия	75	93	300* ⁴	40-45* ⁵	30-35	Механические примеси нефтепродукты
Цветная металлургия	20	91	5	35-40* ⁶ 35-40	25-28 25-30	То же
Целлюлозно-бумажная	7	65	1	32-35* ⁷	25-27	Условно чистая
Предприятия легкой промышленности	-	-	6	35-36	27-28	То же

Подбор градирен для тех или иных отраслей производится по многочисленным критериям, таким как объем охлаждаемой воды, климатические условия размещения сооружения, качество охлаждаемой воды, что видно из таблицы 1.1 столбец 7, местность размещения сооружения и т.д.

1.2 Критический обзор нормативной базы и литературных источников

В развитие теории и практики градирен в свое время 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 работах таких ученых как Л.Д. Барман [2], В.С. Пономаренко [1], Ю.И. Арефьева уделяется внимание в основном технологическим аспектам работы градирни как аппарата для охлаждения оборотной воды и подбору вида данного сооружения по технологическим критериям. Аспекты и технологические требования работы данного сооружения вносят существенный вклад при выполнении проектной документации проектировщиками. Однако они не отвечают на вопросы технологических нагрузок и воздействий в процессе эксплуатации сооружения. При проектировании данного сооружения проектировщику требуется рассмотреть ряд нагрузок и воздействий, действующих на вытяжную башню. Среди всех возможных нагрузок на башенную металлическую градирню особое место занимает ветровая нагрузка и ее корректный учет – один из основных факторов качественного проектирования данных сооружений.

Проведя анализ отечественных норм [3,4] по определению ветрового воздействия на здания и сооружения, отмечаем, что не получено исчерпывающего ответа по определению эпюр распределения локальных аэродинамических коэффициентов. Данные нормы распространяются на здания и сооружения простой геометрической формы. Для градирен данные нормативные документы рекомендуют устанавливать аэродинамические коэффициенты в специальных рекомендациях, а также допускают уточнения на основе модельных аэродинамических испытаний.

В руководстве по расчету зданий и сооружений на действие ветра ЦНИИСК им. Кучеренко [5] регламентирован порядок и сбор ветровой нагрузки на башенные металлические градирни. Также в приложении 1 пункт 12 указаны аэродинамические коэффициенты как для круглого сечения на уровне с резервуарами и дымовыми трубами, что, в свою очередь, не совсем корректно. В пункте 14 приложения 1 [5] указаны коэффициенты давления для шероховатых оболочек, имеющих формы гиперboloида, что применимо только для железобетонных гиперболических градирен.

В пособии по проектированию градирен [6,7] регламентируется классификация данных сооружений, применение и подбор материалов по технологическим требованиям, а также сбор нагрузок и воздействий на железобетонные и каркасно-обшивные башенные металлические градирни. Согласно пункту 6.106 [6] ветровая нагрузка на вытяжную башню принимается согласно СНиП 2.01.07.-85 или в нынешнее время согласно требованиям [3], которые, в свою очередь, ссылаются на данные пособия и рекомендации. Пункт 6.107 [6] рекомендует эпюру аэродинамических коэффициентов по периметру башенной каркасно-обшивной градирни принимать по данным лабораторных аэродинамических исследований. Для башен градирен, имеющих 12 граней и более, допускается принимать аэродинамические коэффициенты в соответствии с [5]. Обратим внимание на то, что в данных пособиях фигурирует термин «допускается». В целом при сборе ветровой нагрузки на башенные металлические градирни опираются на аэродинамические исследования в метеорологических аэродинамических трубах при проведении модельных испытаний.

Нормы Украины [8] и Европейского союза [9] также регламентируют проведение модельных испытаний для зданий и сооружений со сложной геометрической формой.

Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы и проведение аналогий между нормами различных стран хорошо представлен в научной работе А.В. Зубенко [10], при этом общие параметры методик представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Общие параметры методик по нормам [10]

Нормативный документ/ характерный критерий	СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (Россия)	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. ЄВРОКОД 1	ДБН В.1.2-2 2006 Нагрузки и воздействия (Украина)
Количество ветровых районов	7	5	5
Рельеф	не учитывается	оговаривается	оговаривается
Кол-во типов местности	3	5	4
Профиль ветрового давления для высоты (z_e)	$k_{10} \left(\frac{z_e}{10}\right)^{2\alpha}$	$k_r^2 \cdot \ln^2 \left(\frac{z}{z_0}\right)$	Таблично
Пульсационная составляющая для высоты (z_e)	$[1 + \zeta(z_e)]$	$\left[\ln \left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \cdot I_v(z) \right]$	Учитывается коэффициентом динамичности C_d , определяется по графику
Закон изменения ветрового давления	степенной	логарифмический	логарифмический
Интенсивность турбулентности	косвенно фигурирует и представлена коэффициентом пульсаций $\zeta(z_e) = \zeta_{10} \cdot (z/10)^{-\alpha}$	$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)}$	не представлена
Интегральный продольный масштаб турбулентности	Не зависит от высоты и принимается равным $L_v = 1200\text{м}$	$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha$	не представлен

Основные теоретические сведения об архитектурно-строительной аэродинамике, методиках определения ветровой нагрузки на здания и сооружения представлены в работах таких ученых как: Э.И Риттер [11–13], Г.Л. Савицкий [14],

Э. Симиу , Р. Скалан [15], Г. Шлихтинг [16], С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько [17], А.М. Мхитарян [18], Е.В. Горохов, С.Г. Кузнецов [19–21], С.М Горлин [22], В.Н. Гордеев [23], А.Г. Голубаев [24], А.М. Белостоцкий [25], М.Ф. Борштейн.

Аэродинамика в зависимости от метода изучения процессов и явлений имеет три основных направления: теоретическое, экспериментальное и прикладное.

Теоретическая аэродинамика изучает общие закономерности движения воздуха и взаимодействия воздуха с обтекаемыми телами на основе теоретических исследований. Она позволяет уточнять результаты опытов, глубже вникать в сущность процессов и явлений, а также прогнозировать новые, еще неизвестные связи этих явлений. Теоретическая аэродинамика развивается на основе современных достижений в области математики, физики и экспериментальной аэродинамики.

Экспериментальная аэродинамика изучает те же явления, но путем постановки опытов в аэродинамических лабораториях или путем проведения соответствующих испытаний непосредственно в воздухе (классический пример – испытание самолетов). Полученный экспериментальный материал анализируется и используется в практических приложениях (например, в авиационной практике).

Прикладная аэродинамика, используя материалы теоретического и экспериментального направления аэродинамики, разрабатывает теорию полета и создает методы аэродинамического расчета, конструирования и летных испытаний самолета. Раздел прикладной аэродинамики охватывает вопросы аэродинамического расчета и конструирования и называется также *аэродинамика самолета* [25].

Методики проведения экспериментальных модельных испытаний в аэродинамических трубах заимствованы и преобразованы для задач строительной аэродинамики из аэродинамики самолета. Методики проведения экспериментальных исследований аэродинамики профиля крыла описаны Н.Ф. Красновым [26].

Автором выполнен критический анализ публикаций научно-исследовательской базы Scopus. На рисунке 1.4 представлена динамика

публикации научных исследований связанных с исследованием аэродинамических свойств башенных градирен за последние 10 лет. Ежегодное минимальное количество публикаций составило 135 работ, пик приходит на 2018-2019 год и максимальное количество публикаций составило 218 публикаций в год. Статистика, представленная на рисунке 1.4, доказывает актуальность исследований, связанных с башенными градирнями и их аэродинамическими свойствами. Пики и спады выхода публикаций на графике рисунка 1.4 можно охарактеризовать спадом и подъемом экономической составляющей в мире и потребностями данных сооружений в той или иной стране мира.

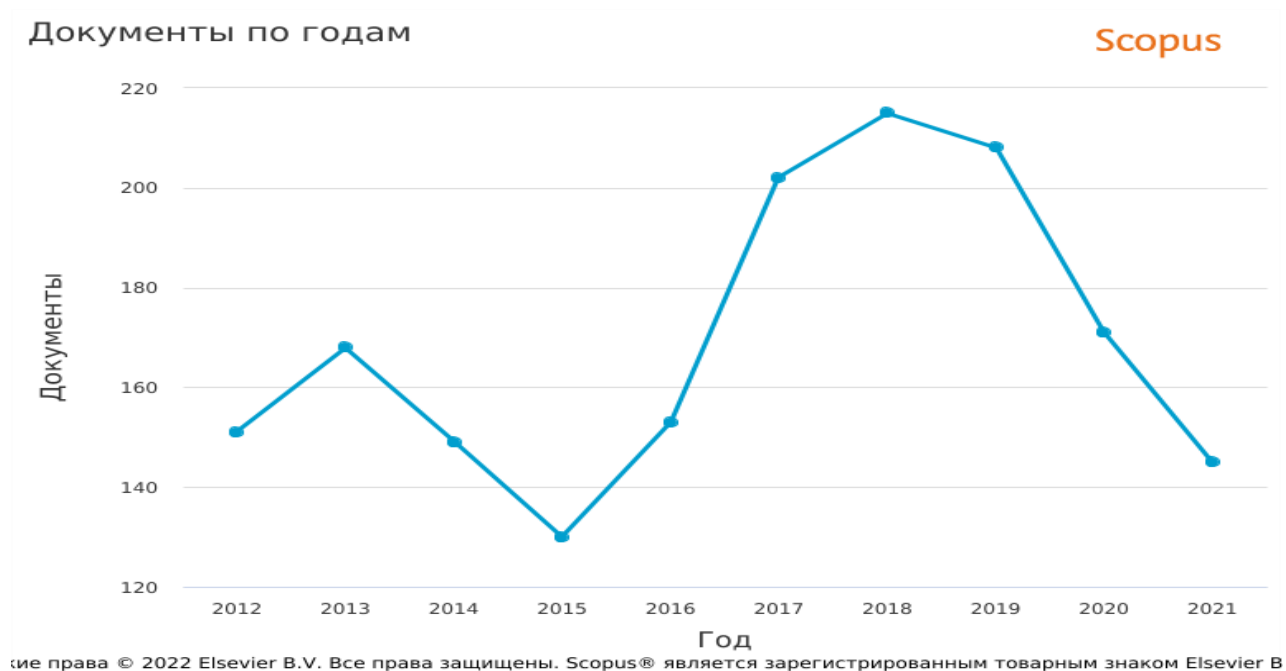


Рисунок 1.4 – Статистика количества публикаций по годам.

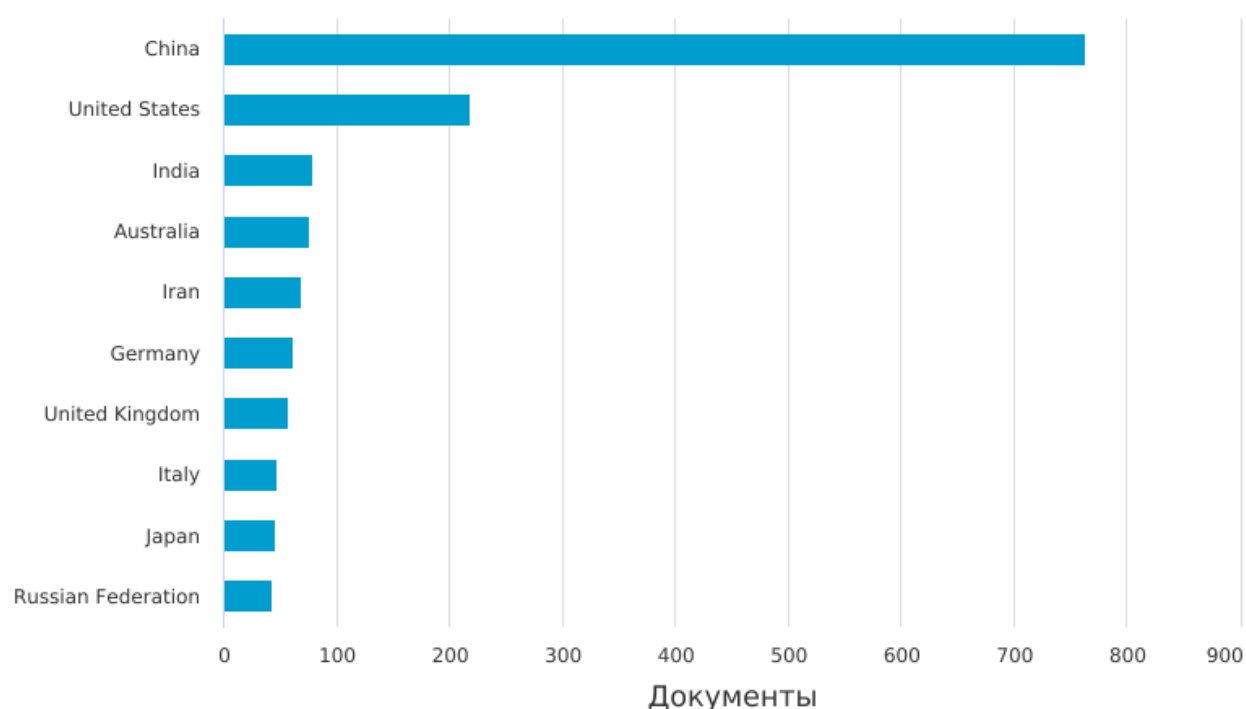
На рисунке 1.5 представлена статистика публикаций из научной базы Scopus, ранжированная для топа 10 ведущих стран мира по количеству публикаций за 10 лет, связанных с башенными градирнями. На первом месте находится Китай, при этом и китайские ученые являются ведущими специалистами, проводящими фундаментальные исследования в области аэродинамики башенных градирен. Ученые Китая проводят натурные исследования и сбор статистических данных в ходе мониторинга объектов ядерной энергетики и тепловых электростанций. Обработка и сбор данной статистики направлена на усовершенствования

действующей нормативной базы Китая по проектированию башенных градирен и школы проектирования в целом. Статистическая информация позволяет связать полученную информацию с модельными испытаниями в аэродинамических трубах и уточнить формирование математических моделей для анализа и проектирования данных сооружений.

Документы по странам или территориям

Scopus

Сравнить количества документов максимум по 15 странам/территориям.



Все права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B

Рисунок 1.5. – Статистика количества публикаций по странам.

Также в десятку стран входят США, Индия, Австралия, Иран, Германия, Британия, Италия, Япония и Российская Федерация. В перечень стран статистики Scopus по количеству публикаций, связанных с башенными градирнями, входят страны, активно развивающие ядерную энергетику и тяжелую металлургию, где зачастую применяются данные сооружения.

На сегодняшний день в мире нет единого подхода по поводу учета ветрового воздействия и его влияния на башенные градирни ввиду многообразия форм вытяжных башен и условий эксплуатации.

Исследованиями в области экспериментальной аэродинамики высотных зданий и сооружений на базе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры занимаются такие ученые как: Е.В. Горохов, С.Г. Кузнецов, В.Ф. Муцанов, Э.А. Лозинский, А.В. Зубенко. В работах Горохова Е.В. затрагиваются вопросы учета ветрового воздействия на высотные здания в условиях городской застройки, много работ посвящено вопросам интерференции в условиях плотной городской застройки [27–39].

В работах С.Г. Кузнецова рассматривается моделирование и оценка приземного пограничного слоя атмосферы [40,41] также исследуется ветровой режим высотных зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки [42,43].

В работе [44] рассмотрено взаимодействие двух высотных зданий в ветровом потоке. Особое внимание привлекают работы, связанные с проведением натурных экспериментальных исследований [20,37].

Э.А. Лозинский в работе [45] также рассматривал ветровое воздействие в условиях плотной городской застройки с выходом на минимизацию воздействия ветра путем нахождения рациональных параметров призматического высотного здания.

В.Ф. Муцанов в своих исследованиях [32,39,46] рассматривал распределение аэродинамических коэффициентов для провисающих мембранных покрытий инженерных сооружений.

А.В. Зубенко рассматривала вопросы интерференции, возникающей от блочного расположения группы резервуаров с учетом различных вариаций исполнения кровли резервуаров. В диссертационной работе [10] проводился ряд модельных экспериментальных испытаний в метеорологической аэродинамической трубе МАТ-1, аэродинамической лаборатории ДОННАСА. Модельные экспериментальные данные, полученные в аэродинамической трубе МАТ-1 послужили основой для проведения верификации математических моделей, выполненных программном комплексе Solidworks Flow Simulation.

На сегодняшний день активно развиваются численные методы строительной аэродинамики, при этом ведущими отечественными специалистами в данной области являются такие ученые как: А.М. Белостоцкий [25,47–52], С.И. Дубинский [53–56], И.Н. Афанасьева [57,58], В.Г. Гагарин [59–61], С.В. Гувернюк [62], А.В. Дорошенко [54], М.И. Казакевич [63], М.Ф. Борштейн [64], А.В. Атаманчук [65], М.И. Козлов [66] .

Вопросами проектирования и оценки ветрового воздействия на башенные градирни занимаются такие ведущие зарубежные ученые как: С.Р. Alimchandani [67], J. Armitt [68], Babu G. Ramesh [69], P.C. Bamu [70], K.Y. Bao [71], S.C. Blue [72], G. Chen [73,74], X.X. Cheng [75–78], N.P. Cheremisinoff [79], A. Diaconita [80], G.C. Dong [81], L. Du [82,83], M. Goudarzi [84], M. Izadi [85], M.M. Jia [86], S.T. Ke [87–106], H.D. Koepper [107], L. Kollár [108], C.L. Kumar [109], B.E. Launder [110], G. Li [111–114], H. Liu [115–117], H. Ma [118–122], G. Murali [123], H.J. Niemann [124,125], J. Noorzaei [126], H. Ruscheweyh [127], L. Shi [128], T. Sun [129], T. Tschanz, A. G. Davenport [130], H. Wang [131,132], Z. Waszczyszyn [133], Q. Wei [134], J. Wu [135], N. Xu [136–138], M. Yu [139], W. Zahlten [140], J.F. Zhang [141–146], L. Zhao [147–153], X. Zhou [154].

В работах этих 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 Государственную ключевую лабораторию 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). Данный коллектив авторов занимается экспериментальными и численными исследованиями, сбором

и обработкой статистических данных на сверхбольших железобетонных и металлических башенных градирнях высотой свыше 180 м.

В работе ученые рассматривают вопросы стационарной и нестационарной реакции на ветер сверх больших градирен [96] при этом проведены натурные измерения колебаний сверх большой градирни высотой 190 м в прибрежном районе при реальном числе Рейнольдса и условиях турбулентного потока. Отклики, вызванные ветром, показали сильную не стационарность. Нестационарные модели, учитывающие не стационарность отклика, важны для достоверной оценки экстремальных откликов сверхбольших градирен. Экстремальная константа, рассчитанная по стационарной модели, не может обеспечить адекватную степень уверенности и снижает экономическую эффективность оценок экстремальной реакции.

Особое внимание привлекает работа [99], в которой рассматриваются изменения и закономерности распределения пульсирующих ветровых давлений и экстремальных ветровых давлений, коэффициентов подъемной силы, сопротивления и корреляции между точками. Наконец, формула подгонки экстремального давления ветра дается на основе нелинейного метода наименьших квадратов. Исследования показывают, что экстремальное значение давления на градирне сначала увеличивается с $-3,91$ до $-1,75$, затем снижается до $-2,28$ с увеличением строительной высоты, коэффициент подъемной силы уменьшается с увеличением строительной высоты, и в первую очередь соотношение переменных ветровых нагрузок увеличивается, а затем уменьшается с ростом высоты.

Основные выводы можно использовать в качестве ориентира для расчетных ветровых нагрузок на большие градирни при строительстве. На рисунке 1.6 приведены рассматриваемые стадии строительства самой высокой железобетонной градирни в мире высотой 220 м.

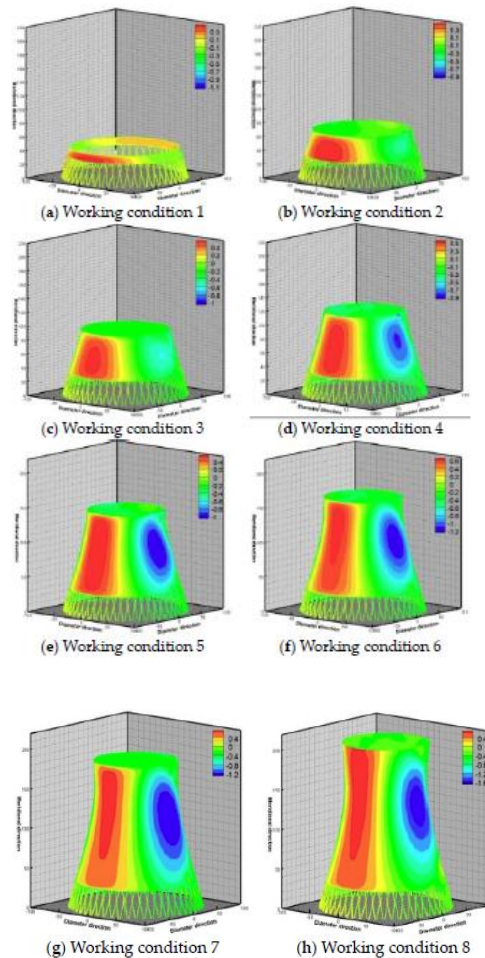


Рисунок 1.6 – Номограммы коэффициента давления на поверхность башни при возведении сверхбольшой башенной железобетонной градирни [99]

Коллективом авторов [99] отмечается, что влияние ветровой нагрузки во время строительства башенных градирен игнорируется во всех существующих нормативных документах и результатах исследований. Оценка и учет ветрового воздействия в процессе строительства позволяет минимизировать погрешности при возведении данных объектов.

Ученые Китая исследуют как железобетонные, так и металлические каркасно-обшивные градирни. Анализ международной научной базы Scopus за последние 10 лет показывает, что 70% исследований связано с башенными сверхбольшими гиперболическими градирнями и 30% связано с башенными сверхбольшими каркасно-обшивными металлическими градирнями. Внимание ученых различных стран мира в основном приковано к сверхбольшим уникальным башенным градирням. Но 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. Ввиду этого результаты будут значительно различаться. Градирни высотой до 100 м преобладают по количеству в странах бывшего СНГ.

1.3 Численные методы исследования ветрового воздействия и их реализация в современных программных комплексах

В настоящее время численные методы широко применяются при решении задач аэродинамики. Эти методы дают возможность предсказать основные закономерности течений, подтвердить и расширить результаты натуральных и лабораторных исследований. Совместное использование вычислительного и физического эксперимента при анализе какого-либо явления позволяет уменьшить количество проводимых экспериментов. Также это позволяет провести верификацию и усовершенствование математических моделей.

Развитие вычислительных технологий существенным образом связано с исследованиями, проводившимися ранее и проводящимися сегодня научными коллективами Института математического моделирования Российской академии наук (РАН) им. М.В. Келдыша, Института вычислительных технологий Сибирского отделения (СО) РАН, Вычислительного центра им. Дородницына РАН, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Центрального института авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Института теплофизики им. С.С. Куталадзе СО РАН, Института теоретической и прикладной механики Уральского отделения РАН, Института теоретической и прикладной механики СО РАН им. С.А. Христиановича и др. Среди зарубежных научных центров следует отметить Imperial College London (Великобритания), University of Manchester (Великобритания), University of Cambridge (Великобритания), University of Toulouse (Франция), Centre for Turbulence Research при University of Stanford (США), Нанкинский университет авиации и астронавтики и Государственная ключевая лаборатория по уменьшению опасности бедствий в гражданском строительстве.

Важно отметить, что указанные списки научных и образовательных организаций не претендуют на полноту и могут быть в существенной степени расширены.

Специалисты в области численных методов исследования используют универсальные программные комплексы Computational Fluid Dynamics (CFD) для решения сложных задач аэродинамических процессов. Наиболее распространёнными программными комплексами в настоящее время для проведения наукоемких инженерных расчетов является ANSYS CFD, ANSYS CFX, ANSYS Fluent, Autodesk CFD, Solidworks Flow Simulation, FLOWVISION, FLOW-3D, STAR-CD и др.

А.М. Белостоцкий [25], П.А. Акимов, И.Н. Афанасьева провели классификацию моделей турбулентности (таблица 1.4), которые применяются в ранее перечисленных программных комплексах. Также проведен анализ вычислительных ресурсов и перспектив практического применения различных подходов к моделированию турбулентных течений (таблица 1.3).

Таблица 1.3 Вычислительные ресурсы и перспективы практического применения различных подходов к моделированию турбулентных течений [25]

Метод	Необходимое число узлов сетки	Необходимое число шагов по времени	Готовность
2D Unsteady RANS (двумерные нестационарные уравнения Рейнольдса)	10^5	$10^{3.5}$	1980
3D Steady RANS (трехмерные стационарные уравнения Рейнольдса)	10^7	10^3	1985
3D Unsteady RANS (трехмерные нестационарные уравнения Рейнольдса)	10^7	$10^{3.5}$	1995
DES	10^7	10^4	2000
LES	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

Таблица 1.4 Классификация моделей турбулентности [25]

Класс		Модель		
RANS (Reynolds Averaged Navier- Stokes)	Linear Eddy Viscosity Model	Zero Equation Models (Algebraic Turbulence Models)	Cebeci-Smith (1967) Baldwin-Lomax (1978) Johnson-King (1985)	
		One Equation Models	Prandtl's one-equation model Baldwin-Barth (1990) Spalart-Allmaras (1992)	
		Two Equation Turbulence	k- ϵ models:	Standard k- ϵ (Launder и Spalding, 1974) RNG k- ϵ (Yakhot и Orszag, 1986) Realizable k- ϵ (Shih., 1995) LRN-LS (Launder и Sharma, 1974) LRN-JL (Jones и Launder, 1973) LRN-NT (Nagano и Tagawa, 1974) LRN-LB (Lam и Bremhorst, 1981)
	k-co models:		Wilcox k-co (Wilcox, 1994) Baseline (BSL) k-co (Menter, 1994) SST k-co (Menter, 1994)	
	Nonlinear Eddy Viscosity Models		v2-f models:	v2 - f model (Laurence, 2004) q - f model (Popovac, 2004)
			Reynolds Stress Models (RSM)	LRR (Launder-Reece-Rodi, 1975) SSG (Speziale-Sarkar-Gatski, 1991) Baseline (BSL) k-co RSM EARSM (Wallin и Johansson, 2000)
	LES		Smagorinsky model (Smagorinsky, 1963) Algebraic Dynamic model (Germano, Lilly, 1991) WALE (Nicoud and Ducros, 1999)	
DES		DES-SA (Стрелец М.Х., 1999) DES-SST (Cipene4 М.Х., 2001) DES (ASM) (Batten., 2002) DDES (Spalart P.R., 2006) IDDES (Shur M.L., 2008)		
Scale-Adaptive Simulation (SAS)		SAS-SST (Menter, Yegorov, 2005) SAS-DES (Menter, Yegorov, 2005)		

По направлению численного моделирования ветрового воздействия можно отметить работы таких авторов как А.М. Белостоцкий [116–121; 149], С.И. Дубинский [133–136], И.Н. Афанасьева [112; 113], В.Г. Гагарин [125–127], С.В. Гувернюк [132], А.В. Дорошенко [134], М.И. Казакевич [138], М.Ф. Борштейн [123], А.В. Атаманчук [1], М.И. Козлов [139] и др. Зарубежные авторы публикации которых связаны с численными методами моделирования ветрового потока на башенные градирни: S.T. Ke [86–89,92,93,95,98,101,102,104–106], H.D. Koepper [66], L. Kollár [67], C.L. Kumar [47], B.E. Launder [68], G. Li [112,114], H. Liu [71–73], G. Murali [74], J. Noorzaei [78], J.F. Zhang [142,143,146] и др. Численное моделирование ветрового потока с последующей верификацией с экспериментальными данными осуществляли: S.T. Ke [103], G. Li [113], G.C. Dong [81], X.X. Cheng [76,78], L. Du [83], H. Wang [132], L. Zhao [147,148] и др.

1.4 Методы экспериментальных исследований ветрового воздействия и их реализация

В настоящее время в существующей практике при экспериментальном моделировании обычно используют специальные аэродинамические трубы метеорологического типа с длинной рабочей частью, в которых структура потока соответствует так называемой пристеночной турбулентности и формируется аналогично натуре.

Конструкции аэродинамических труб и их классификация приведена в работах Е.В. Горохова, С.Г. Кузнецова [19,20], Н.Ф. Краснова [26]. Площадь сечения, как правило, не превышает семь квадратных метров. В аэродинамических трубах физическое моделирование подразделяется на количественные эксперименты и визуализационные, которые, в свою очередь, являются неотъемлемой частью друг друга.

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.

Визуализационные эксперименты позволяют оценить характер обтекания ветрового потока, что в свою очередь сокращает выборку теорий, по которой проводится численные исследования:

- Теневой метод лазерного ножа;
- Метод шелковинок и др.

По направлению физического моделирования ветрового потока следует отметить следующие работы отечественных ученых таких как: Е.В. Горохов [27–39], С.Г. Кузнецов [21,40,42–44,155,156], В.Ф. Мушанов [46], Э.А. Лозинский [45], А.В. Зубенко [10], И.М. Гаранжа [157]. Работы зарубежных авторов таких как: С.Р. Alimchandani [28], J. Armitt [31], Babu G. Ramesh [49], Р.С. Vamu [32], К.У. Bao [33], S.C. Blue [35], G. Chen [41; 85], X.X. Cheng [37; 38; 50; 96], N.P. Cheremisinoff [39], A. Diaconita [43], G.C. Dong [81], L. Du [45; 46], M. Goudarzi [52], M. Izadi [55], M.M. Jia [30], H. Ma [34; 48; 80; 88; 101], H.J. Niemann [75; 76], J. Noorzaei [78], H. Ruscheweyh [87], L. Shi [53], T. Sun [91], T. Tschanz, A. G. Davenport [93], H. Wang [92; 94], Z. Waszczyszyn [77], Q. Wei [23], J. Wu [79], N. Xu [26; 54; 104], M. Yu [103], W. Zahlten [105], L. Zhao [27; 44; 51; 83; 98; 108; 109], X. Zhou [90], X.L. Zhu [110], Y.F. Zou [36; 111].

1.5 Цели и задачи исследования

На основе результатов критического анализа, представленного в I главе работы, сформулированы:

цель исследования – 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.

объект исследования – отдельно стоящие каркасно-обшивные башенные металлические градирни площадью орошения до 1600м².

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

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.

Поставленная цель исследования достигается путем решения основных **задач 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.

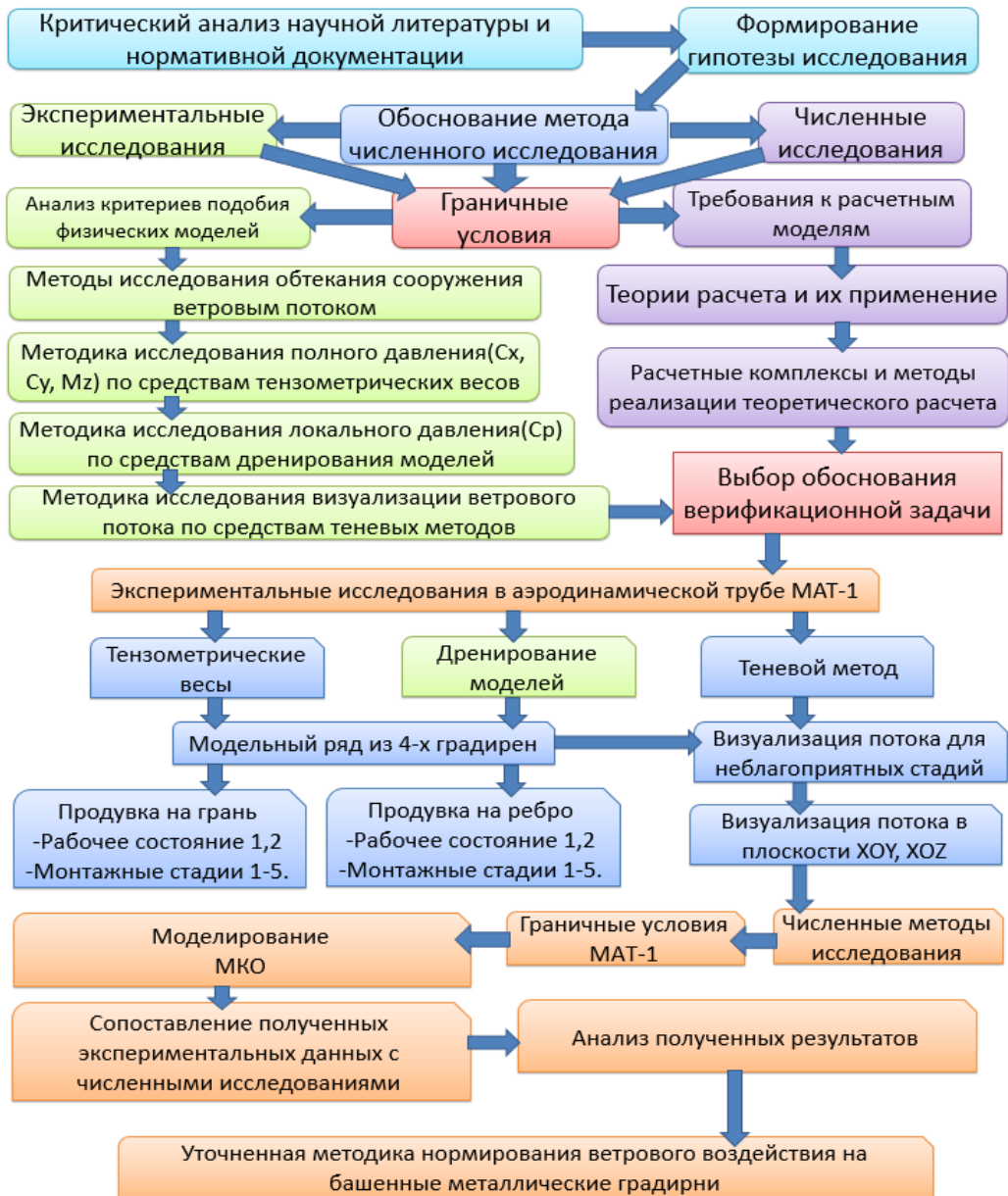


Рисунок 1.7 – Структурно-логическая схема диссертационного исследования

РАЗЕЛ II. МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБТЕКАНИЯ СООРУЖЕНИЯ ВЕТРОВЫМ ПОТОКОМ

2.1 Критерий подобия физического моделирования

В аэродинамических экспериментах в строительной отрасли исследуется движение газа относительно покоящегося неподвижного тела, так как в натуре имеется различное количество факторов, влияющих на аэродинамику сооружения. Перед исследователем стоит задача вычлнить наиболее существенно влияющие факторы на аэродинамику сооружения и учесть их при проведении эксперимента. Наибольшее распространение в экспериментальной аэродинамике получили опыты, проводимые на моделях. Максимально приближенные модели продуваются в условиях ограниченного потока (в аэродинамических трубах) и на основе полученных данных делаются заключения о поведении натуральных объектов в натуральных условиях.

Достоверность полученных результатов зависит от сопоставления принятого масштаба модели к площади сечения аэродинамической трубы. Также большое влияние на достоверность полученных результатов проведенных экспериментов влияет детализация модели сооружения [20] соблюдения условий критерия подобия.

Моделирование явлений — это замена изучения интересующего нас явления в натуре изучением аналогичного явления на модели другого масштаба. Моделирование необходимо для рассмотрения физически подобных явлений, при этом обязательным критерием моделирования является соблюдение геометрического подобия. При вычисленном коэффициенте геометрического подобия – масштабе модели вычислением пропорции определяются размеры геометрически подобного натурального объекта если при расчете по заданным характеристикам одного явления возможно нахождение характеристик другого явления, то такие явления механически и физически являются подобными. Для сохранения подобия при моделировании необходимо обеспечить ряд условий.

Подобные явления характеризуются однородными физическими величинами, находящимися для любых точек пространства в одинаковом отношении. Соотношения между массами, скоростями и другими величинами для первого и второго случая могут быть получены из зависимостей, которые должны присутствовать в первом и во втором случае.

Для любых точек соответствующего рассматриваемого течения вязкой несжимаемой жидкости необходимо выполнение механического подобия двух течений:

$$\frac{t_2 U_2}{l_2} = \frac{t_1 U_1}{l_1}; \frac{z_2 l_2}{U_2^2} = \frac{z_1 l_1}{U_1^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{\nu_2}{U_2 l_2} = \frac{\nu_1}{U_1 l_1}; \frac{p_2}{\rho_2 U_2^2} = \frac{p_1}{\rho_1 U_1^2} \quad (2.2)$$

где:

t – характерное время;

l – характерный размер;

ρ – плотность;

ν – кинетический коэффициент вязкости;

z – массовая сила;

U – скорость;

p – давление (с индексом «1» обозначены величины первого потока с индексом «2» - ко второму).

Первое соотношение является условием кинетического подобия. Остальные характеризуют условия динамического подобия.

Для сохранения подобия при изучении движения жидкости либо газа необходимо в модельном потоке сохранить те же отношения $t \times U/l$, что и для натурального потока. На практике для анализа периодических явлений используют критерий подобия Струхала:

$$Sh = \frac{f \times l}{U} \quad (2.3)$$

где: f – частота.

При изучении установившегося течения вязкой несжимаемой жидкости необходимо выполнить два условия подобия:

$$Fr = \frac{u^2}{g \times l} \text{ число Фруда} \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{l \times U}{\nu} \text{ число Рейнольдса} \quad (2.5)$$

Исходя из этих двух параметров вязкой несжимаемой жидкости двух рассматриваемых потоков в натуре и в модельном эксперименте, при одинаковых числах Рейнольдса и Фруда потоки являются подобными. При рассмотрении подобных явлений изучается течение около или внутри геометрически подобных тел, одинаково ориентированных относительно набегающего потока жидкости или газа.

Рассмотрение двух натуральных и экспериментальных потоков является весьма сложной задачей и заключается в соблюдении равенства следующих безразмерных критериев: Рейнольдса, Маха, Фруда, Струхаля. Достижение полного подобия в данных экспериментах не всегда осуществимо и на первых этапах эксперимента целесообразно осуществлять анализ зависимости коэффициента C_{p_i} от числа Рейнольдса Re . При достижении критического числа Рейнольдса коэффициент C_{p_i} считается независимым и не изменяемым при повышении числа Re . Это явление в аэродинамике называется автомодельностью при котором выполняется подобие потоков по числу Re .

2.2 Аэродинамическая труба МАТ-1

В Донбасской национальной академии строительства и архитектуры разработана метеорологическая аэродинамическая труба дозвуковых скоростей МАТ-1, предназначенная для проведения экспериментальных исследований масштабных моделей зданий, сооружений и их комплексов с моделированием пограничного слоя атмосферы, а также для проведения широкого спектра аэродинамических исследований различных строительных объектов при решении специализированных задач при разработке полномасштабных (натурных)

исследований. Характеристики МАТ-1 (рисунках 2.1 - 2.4): 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 2.1 – МАТ-1 ДОННАСА



Рисунок 2.2 – Рабочая часть МАТ-1 ДОННАСА.



Рисунок 2.3 – Сопло с Хонейкомбом МАТ-1 ДОННАСА.

Основные составные элементы аэродинамической трубы:

- входной канал с хонейкомбом и мелкоячеистой детурбулизирующей сеткой;
- сопло (для поджатия и выравнивания потока);
- рабочая часть, где выполняются эксперименты;
- переход между секцией вентилятора и рабочей частью;
- вентилятор для прогона воздуха через систему;
- диффузор (для замедления потока, выходящего в окружающее пространство).

С целью создания благоприятных условий формирования потока воздуха при входе и при выходе в аэродинамическую трубу, по оси трубы на торцевых стенах трубного зала установлены конические рассекатели.

Схема выбранной аэродинамической компоновки МАТ-1 и размеры основных ее элементов показана на рисунке 2.4.

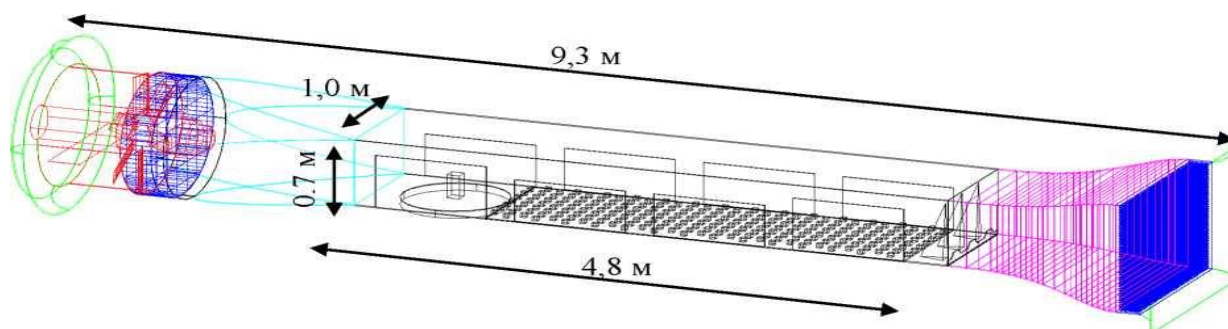


Рисунок 2.4 – Метеорологическая аэродинамическая труба -1(МАТ-1)
ДОННАСА.

Перечень возможных задач исследований в аэродинамической трубе МАТ-1 ДОННАСА:

1. Изучение обтекания различных тел ламинарным потоком.
2. Обтекание тел потоком с пограничным слоем нейтральной атмосферы:
 - определение спектров скоростей движения воздуха и ветровых нагрузок;
 - моделирование аэродинамических эффектов для определения динамических воздействий;
 - исследование теплопотерь и воздухообмена помещений зданий под действием ветра;
 - изучение ветрового режима жилой застройки с целью выявления аэрации и создания комфортных условий пребывания людей на ее территории;
 - Изучение обтекания элементов рельефа земной поверхности.
3. Изучение ветропотенциала территорий для обоснования размещения ветрогенерирующих установок и ветроэлектростанций.
4. Обтекание тел термически стратифицированным пограничным слоем атмосферы:
 - изучение распространения примесей;
 - моделирование микроклиматических особенностей локальных территорий застройки.

Объектами исследования выступают: здания и сооружения различной геометрии и назначения, группы застроек, строительные элементы, рельеф, масштаб моделей 1:1 - 1:10000.

2.3 Планетарный пограничный слой атмосферы

Приземный пограничный слой атмосферы представляет собой высокотурбулентный, непостоянный и неоднородный воздушный поток, который можно описать только с помощью стохастических средств. Турбулентная структура ветра такова, что, несмотря на стохастический характер, соседние частицы не являются независимыми друг от друга. Поток пограничного слоя

можно описать с помощью стохастических функций. Это упрощает моделирование многих параметров при изучении ветровых нагрузок.

Описание природного ветра базируется на модели турбулентности. Структура турбулентности зависит от шероховатости поверхности. Чтобы произвести моделирование потока пограничного слоя в аэродинамической трубе, необходимо создать условия, подобные натурным.

Подобие граничных условий требует подобия следующих характеристик:

- распределения шероховатости поверхности аэродинамически шероховатыми свойствами;
- топографического рельефа;
- распределения температуры поверхности;

Подобие характеристик набегающего потока требует подобия следующих характеристик:

- распределения средней и пульсационной компонент скорости;
- распределения средней и пульсационной составляющих температуры;
- продольного градиента давления (должен быть равен нулю);
- равенства отношений, если течение состоит из двух слоев.

Для обеспечения равенства степени турбулентности I_u , поля скорости в лабораторной установке смоделирован приземный-пограничный слой атмосферы. Атмосферный пограничный слой в аэродинамической трубе МАТ-1 смоделирован в виде поля кубиков размерами 16x16x16 мм и 16x16x7 мм, которые располагаются в шахматном порядке по всей горизонтальной поверхности рабочей части аэродинамической трубы. Пограничный слой обеспечивает торможение потока и требуемую турбулентность в нижнем слое. Установлены также три генератора турбулентности в форме двояковыпуклых шпилей, расположенных вертикально, при обтекании которых с кромок стенки происходит срыв потока в виде вихрей, образуя турбулентность; барьер в виде трех зубчатой пластины, расположенный перпендикулярно потоку, формирующий требуемое направление и скорость (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Элементы шероховатости модели приземного пограничного слоя атмосферы в трубе МАТ-1

2.4 Распределение скорости масштаба турбулентности в рабочем канале МАТ-1

Описание шероховатости поверхности местности по своим свойствам делится на четыре типа. В таблице 2.1 приведены типы местности с описанием свойств поверхности, минимальной высотой элементов, образующих шероховатость z_{min} и показателем профиля.

Таблица 2.1 – Типы местности и их параметры

Тип местности	Описание свойств поверхности	z_{min}	l/a
1	2	3	4
I	Протяженные водные пространства, открытое море, ровная местность, поверхность, покрытая снегом и льдом	2 м	0,08 - 0,12
II	Типичные ландшафты с зелеными насаждениями, полями, пастбищами	4 м	0,13 - 0,18
III	Лесные массивы, низкие застройки, окраины города (пригород), маленький город	8 м	0,20 - 0,24
IV	Центры городов с высотными зданиями	16 м	0,28 - 0,40

В результате проведенных экспериментальных исследований был получен график распределения скорости потока (рис. 2.6) в рабочем канале МАТ-1.

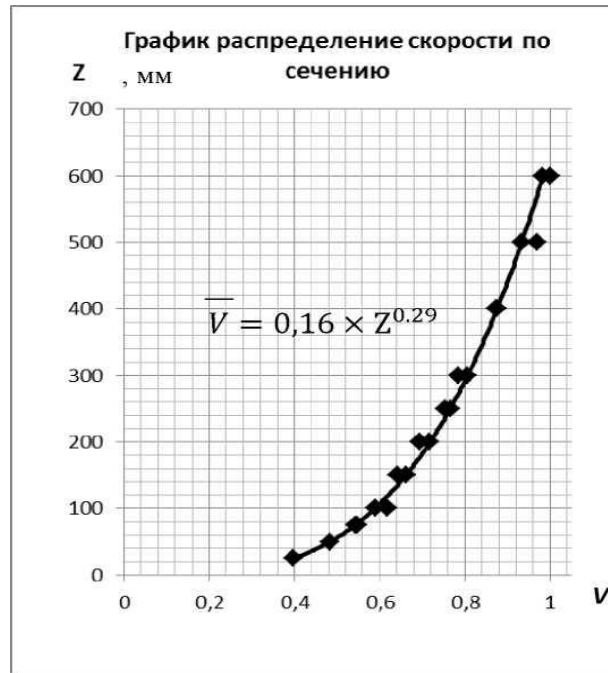


Рисунок 2.6 – Распределение скорости потока в вертикальной плоскости рабочего канала МАТ-1.

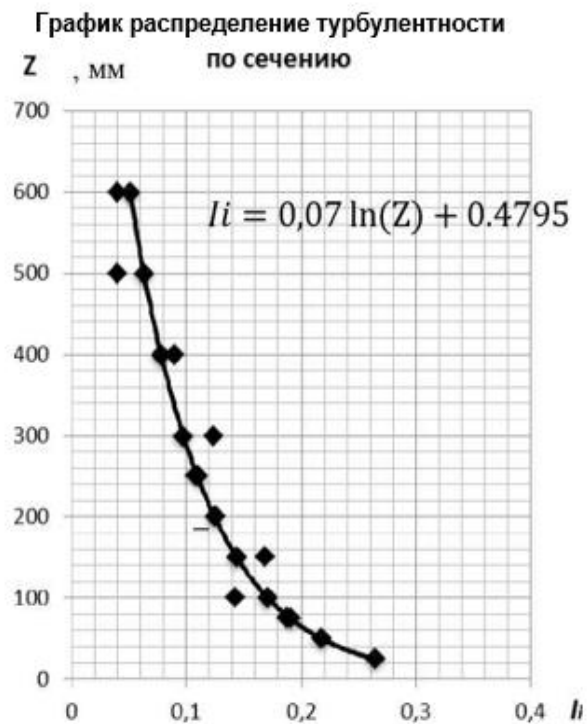


Рисунок 2.7 – Распределение турбулентности потока в вертикальной плоскости рабочего канала МАТ-1

2.5 Система сбора и обработки данных

Таблица 2.2 – Основные характеристики оборудования

Наименование оборудования	Характеристика	Показатель
Датчик малого давления MOTOROLA MPX5004DP	- диапазон измерение давления - корпус - температурная компенсация - выходной сигнал	0 - 3,92 кПа пластиковый №1351 - позволяющий измерять разницу P1-P2 10 -60°C 0 - 4,9 В
Датчик влажности воздуха ДВ-03	- выходной сигнал - диапазон измерений	4 - 20мА, 0 - 10 В, RS 485 0 - 100%
Датчик температуры ТС 3194-Pt1000.B2.250/2	- диапазон измерений - погрешность - выходной сигнал	-50 - +120°C (0,3+0,005t)°C RS 485
Периферийный процессор TRM 138	- количество измерит. каналов - входной сигнал - выходной сигнал	8 0 - 1 В RS 485
Преобразователь АС-3М	- входной сигнал - выходной сигнал	RS 485 RS 232
ЭВМ	- материнская плата	с расширителем COM - портов
Коммутационное оборудование	- экранированный кабель - установленная система SCADA OWEN OPC	5-ти жильный частота опроса датчиков 1Гц Графическое отображение

Оценка ошибок определения относительных коэффициентов ветрового давления с помощью разработанной системы SCADA:

$$\theta_{C_{P_i}} = \gamma_{C_{P_i}} \times C_{P_i} = \frac{\theta_{\Delta P_i}}{q} + C_{P_i} \frac{\theta_q}{q} = 0,025 + 0,013 \times C_{P_i} = 0,02 - \text{систематическая ошибка}$$

$\varepsilon_{Cp_i} = t \times \sigma_{Cp_i} = 1,6 \times 0,0011 = 0,02$ – случайная ошибка мгновенного значения

$$\sigma_{M_{Cp_i}} = \sqrt{\frac{(\sigma_{Cp_i})^2}{n}}; 0,01 < \sigma_{M_{Cp_i}} < 0,038 \text{ – среднее квадратичное отклонение}$$

$$\Delta_{Cp_{кр}} = K \sqrt{\frac{\theta_{Cp_i}^2}{3} + \varepsilon_{Cp_{кр}}^2}; 0,03 < \Delta_{Cp_{кр}} < 0,1 \text{ – полная ошибка.}$$

2.6 Методы численного исследования обтекания сооружений ветровым потоком

Исследование обтекания ветровым потоком зданий и сооружений проводится в аэродинамических трубах малых дозвуковых скоростей ветрового потока. Аэродинамическая труба – это установка, в которой моделируется искусственный прямолинейно направленный поток воздуха. Для исследования обтекания зданий и сооружений используют метеорологические аэродинамические трубы, в которых моделируется приземный пограничный слой набегания ветрового потока. В аэродинамических трубах получают значения полного давления по средствам проведения весовых тензометрических экспериментов, получение локальных коэффициентов давления в исследуемых областях испытываемой модели по средствам дренажных экспериментов, изучение характера набегания ветрового потока на модель и получение характеристических данных обтекания испытываемой модели и образование завихрений по средствам теневых методов или приближенного метода оценки завихрений метода шелковинки.

Перечисленные данные и методы их получения должны выполняться в комплексе исследования обтекания зданий и сооружений для получения полной картины влияния ветрового потока на модель сооружения. Но выполнение полного комплекса исследования зачастую очень трудоемко. Трудоемкость в проведении данных исследований складывается из:

- Разработка и выполнение испытываемой модели;
- Масштабирование испытываемой модели;

- Проведение весовых тензометрических испытаний для предварительной оценки отклика модели и выбора скорости потока воздуха, при котором выполняется критерий подобия по Re .

- Выбор количества и расстановки датчиков для определения локальных аэродинамических коэффициентов в характерных точках или областях испытываемой модели.

- Визуализация ветрового потока теневыми методами для определения характера обтекания испытываемой модели и подбора теории распределения для проведения численных расчетов.

От полноты проведения экспериментальных исследований зависит точность проведения верификационных численных исследований и выбора расчетно-теоретических предпосылок. Зачастую при проведении экспериментальных исследований по нахождению и оценке локальных коэффициентов ветрового давления мы ограничены количеством имеющихся в наличии интегрированных датчиков локального давления. При увеличении количества исследуемых точек увеличивается объем обрабатываемых данных. Соответственно увеличивается трудоемкость, время обработки и получения экспериментальных данных. Затрудняется представление полученных данных.

В этом случае нам помогают расчетные комплексы, в которых проводятся численные исследования влияния ветрового потока на испытываемую модель. Численные исследования рекомендуется выполнять на этапе планирования эксперимента для выбора масштаба и модельного ряда испытываемых моделей, а также выбора характерных точек исследования и верификации численного эксперимента с проведенными испытаниями в аэродинамической трубе. Численные методы исследования позволяют нам уменьшить трудоемкость проведения аэродинамических исследований путем численного моделирования характеристик аэродинамической трубы, профиля потока набегающего воздуха и характеристик испытываемой модели, а также выбранной теории расчета. Расчетные комплексы позволяют нам оценить сходимость в выбранных исследуемых точках

и получить полную картину обтекания всей модели с различными визуальными эффектами.

2.7 Программа проведения модельных экспериментальных исследований в МАТ-1

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 масштабных экспериментальных исследований в лаборатории строительной аэродинамики в метеорологической аэродинамической трубе (МАТ-1) ДОННАСА. Программа включает в себя три вида экспериментов:

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 2.8); десять (рисунок 2.9); двенадцать (рисунок 2.10) и одна гиперболической формы в двенадцать граней (рисунок 2.11). 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 2.8 – Модельный ряд восьмигранной градирни с учетом монтажных стадий

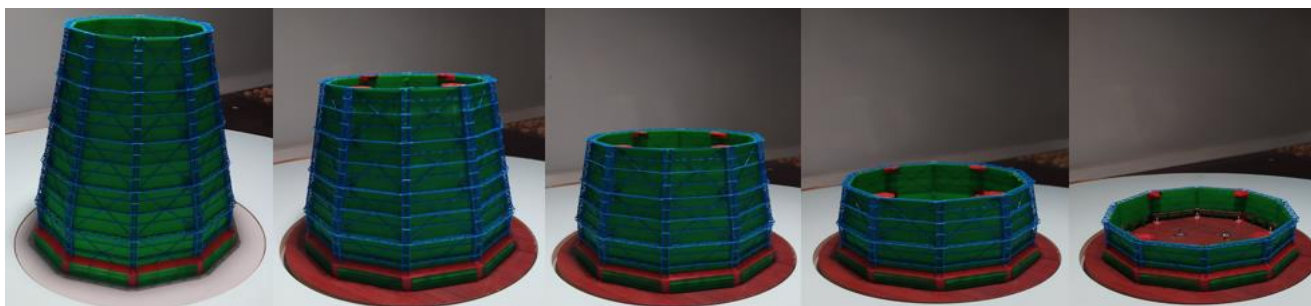


Рисунок 2.9 – Модельный ряд десятигранной градирни с учетом монтажных стадий

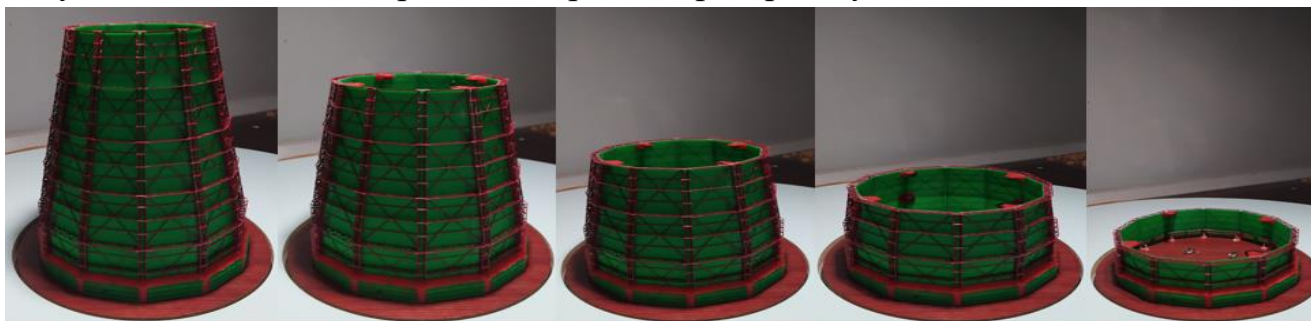


Рисунок 2.10 – Модельный ряд двенадцатигранной градирни с учетом монтажных стадий

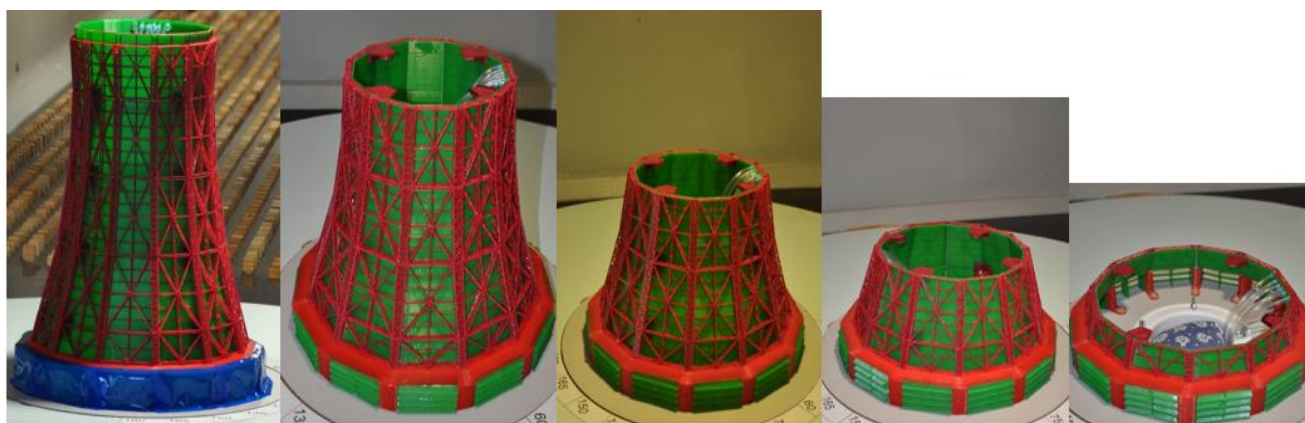


Рисунок 2.11 – Модельный ряд двенадцатигранной гиперболической градирни с учетом монтажных стадий

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 2.12) ветровым потоком. Исходя из распределения давлений на поверхности исследуемых моделей принято решение расстановки датчиков в местах сопряжения карт ярусов, что позволит получить экспериментальные значения распределения C_p на этапе строительства и эксплуатации.

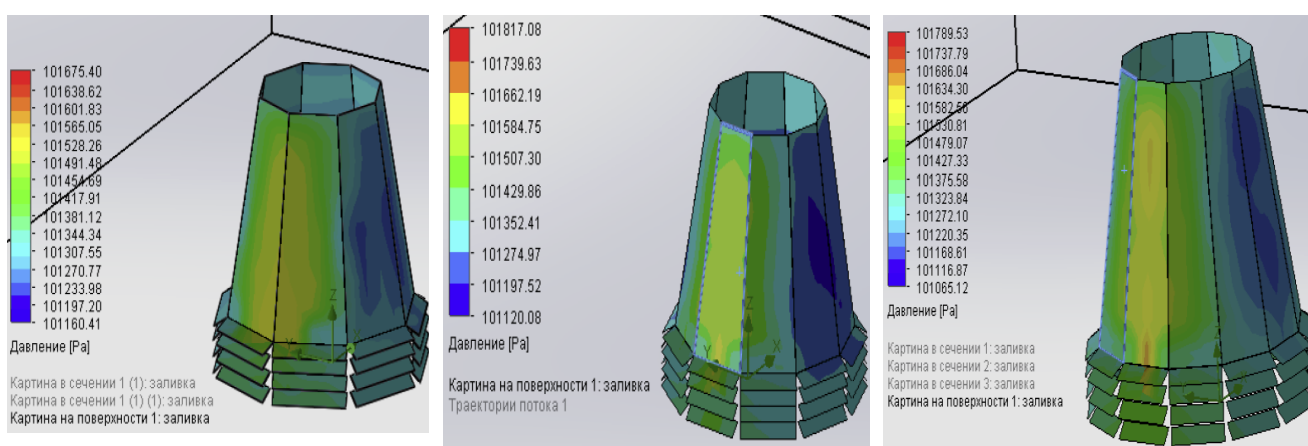


Рисунок 2.12 – Предварительные численные исследования распределения ветрового давления по поверхности восьми, десяти, двенадцатигранной модели башенной градирни.

Таблица 2.3 – Вариации моделей сооружений

№ п/п	Геометрические характеристики модели	Стадия эксплуатации
1.	Градирня пирамидальная 8 граней h=55м	Эксплуатация в летний период (открытие подкрылки)
2.	Градирня пирамидальная 8 граней h=55м	Эксплуатация в зимний период (закрытие подкрылки)
3.	Градирня пирамидальная 8 граней h=11м	Монтажная стадия 1 (замыкание первого яруса карт)
4.	Градирня пирамидальная 8 граней h=22м	Монтажная стадия 2 (замыкание второго яруса карт)
5.	Градирня пирамидальная 8 граней h=33м	Монтажная стадия 3 (замыкание третьего яруса карт)
6.	Градирня пирамидальная 8 граней h=44м	Монтажная стадия 4 (замыкание четвертого яруса карт)
7.	Градирня пирамидальная 8 граней h=55м	Монтажная стадия 4 (замыкание пятого яруса карт отсутствуют подкрылки)
8.	Градирня пирамидальная 10 граней h=55м	Эксплуатация в летний период (открытие подкрылки)
9.	Градирня пирамидальная 10 граней h=55м	Эксплуатация в зимний период (закрытие подкрылки)
10.	Градирня пирамидальная 10 граней h=11м	Монтажная стадия 1 (замыкание первого яруса карт)
11.	Градирня пирамидальная 10 граней h=22м	Монтажная стадия 2 (замыкание второго яруса карт)
12.	Градирня пирамидальная 10 граней h=33м	Монтажная стадия 3 (замыкание третьего яруса карт)
13.	Градирня пирамидальная 10 граней h=44м	Монтажная стадия 4 (замыкание четвертого яруса карт)

14.	Градирня пирамидальная 10 граней h=55м	Монтажная стадия 4 (замыкание пятого яруса карт отсутствуют подкрылки)
15.	Градирня пирамидальная 12 граней h=55м	Эксплуатация в летний период (открытие подкрылки)
16.	Градирня пирамидальная 12 граней h=55м	Эксплуатация в зимний период (закрытие подкрылки)
17.	Градирня пирамидальная 12 граней h=11м	Монтажная стадия 1 (замыкание первого яруса карт)
18.	Градирня пирамидальная 12 граней h=22м	Монтажная стадия 2 (замыкание второго яруса карт)
19.	Градирня пирамидальная 12 граней h=33м	Монтажная стадия 3 (замыкание третьего яруса карт)
20.	Градирня пирамидальная 12 граней h=44м	Монтажная стадия 4 (замыкание четвертого яруса карт)
21.	Градирня пирамидальная 12 граней h=55м	Монтажная стадия 4 (замыкание пятого яруса карт отсутствуют подкрылки)
22.	Градирня гиперболическая 12 граней h=55м	Эксплуатация в летний период (открытие подкрылки)
23.	Градирня гиперболическая 12 граней h=55м	Эксплуатация в зимний период (закрытие подкрылки)
24.	Градирня гиперболическая 12 граней h=11м	Монтажная стадия 1 (замыкание первого яруса карт)
25.	Градирня гиперболическая 12 граней h=22м	Монтажная стадия 2 (замыкание второго яруса карт)
26.	Градирня гиперболическая 12 граней h=33м	Монтажная стадия 3 (замыкание третьего яруса карт)
27.	Градирня гиперболическая 12 граней h=44м	Монтажная стадия 4 (замыкание четвертого яруса карт)

28.	Градирия гиперболическая 12 граней $h=55\text{м}$	Монтажная стадия 4 (замыкание пятого яруса карт отсутствуют подкрылки)
-----	--	--

2.7.1 Программа тензометрических весов исследований

Тензометрические весы представляют собой прибор, измеряющий внешнее силовое давление ветрового потока на испытуемую модель, направленное по соответствующей компоненте X , Y , Z , а также моменты по соответствующим осям. В аэродинамической лаборатории ДонНАСА разработана в 2010 г. система определения результирующих аэродинамических характеристик моделей зданий и сооружений с учетом мирового опыта. Основу системы составляет аэродинамическая труба МАТ-1, аэродинамические весы (конструкции ПолтНТУ), аналогово-цифровой преобразователь (конструкции ДонНАСА) и персональный компьютер с системой SCADA.

Конструктивная схема трехкомпонентных весов, измеряющих лобовое сопротивление, подъемную силу, аэродинамический момент приведена на рисунке 2.8.

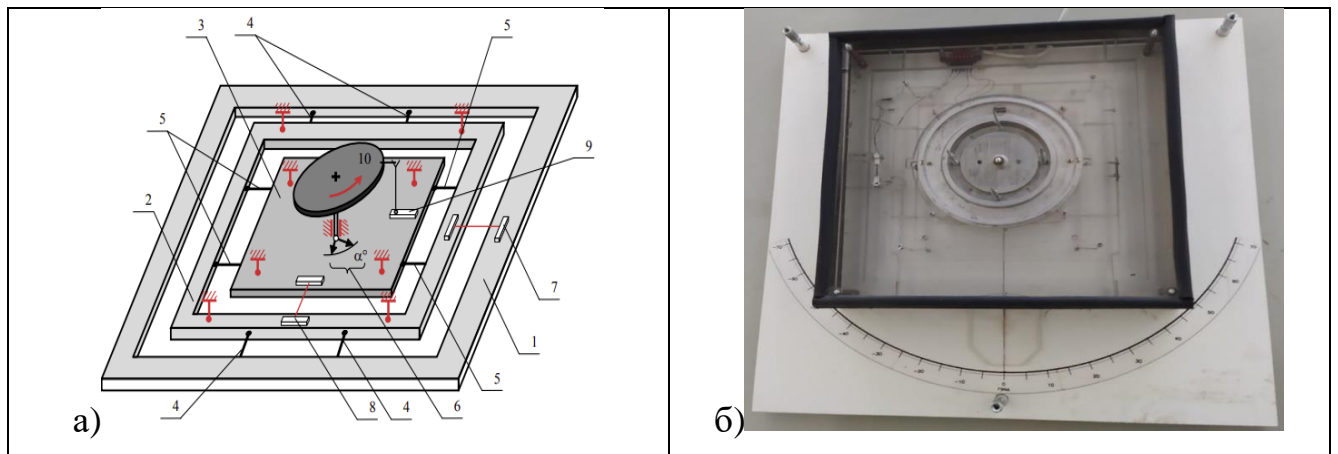


Рисунок 2.8 – Трех компонентные аэродинамические весы: а) кинематическая схема; б) фото весов: 1-основание; 2-подвижная рамка Y ; 3-подвижная рамка X ; 4,5-растяжки; 6-измеритель угла поворота; 7-датчик Y ; 8-датчик X ; 9-датчик Z ; 10-платформа.

Перед началом испытаний необходимо установить тензометрические весы в аэродинамическую трубу МАТ-1, проверить горизонтальность и жесткость

закрепление весов. После этого провести калибровку и проверку весов с помощью установки эталонных гирь Г-4-211.10, начиная от 1 грамма до 100 грамм и сверки полученных данных от пригруза с показателями системы SCADA. После проведенной калибровки и проверки оборудования исследуемая модель устанавливается на весы и закрепляется винтами.

Испытуемая модель обдувается на различных скоростях от 3м/с до 25м/с для выявления критического числа Рейнольдса и поиска оптимальной скорости набегания ветрового потока для последующих дренажных испытаний. Данная операция проводится для всех вариаций модельного ряда, представленных в таблице 2.3 с различными углами атаки ветрового потока на испытуемую модель.

Цель проведения весовых тензометрических испытаний:

- Определение числа Re (Рейнольдса)
- Нахождение коэффициента полного давления C_x ; C_y ; C_{mz} .

Выполнен тензометрический весовой эксперимент с помощью тензометрических трехкомпонентных весов. Данный эксперимент позволил найти коэффициент полного давления C_x, C_y, 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 2.9).

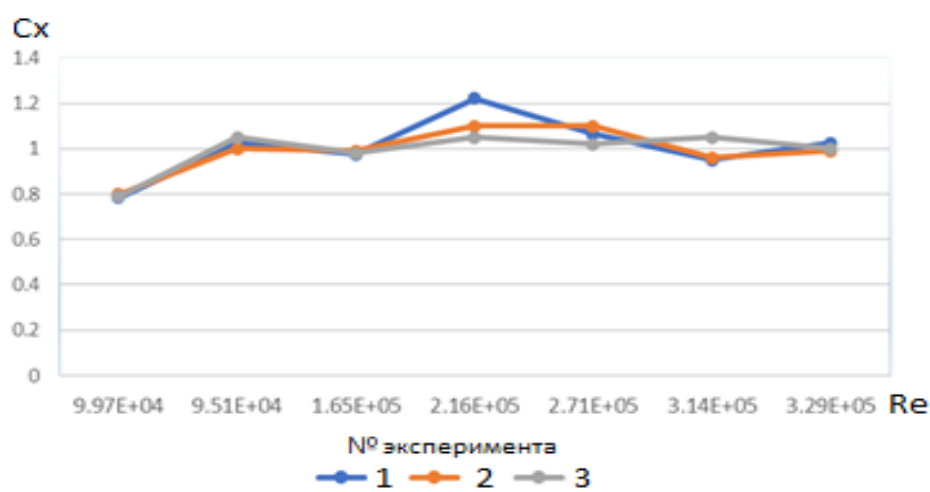


Рисунок 2.9 – Экспериментальная зависимость $C_x = f(Re)$

2.7.2 Программа проведения дренажных экспериментальных исследований

Дренажные экспериментальные исследования являются наиболее распространённым видом исследования для нахождения локальных аэродинамических коэффициентов. Перед началом проведения дренажных исследований необходимо определиться с расположением дренажных отверстий в модели с тем, чтобы максимально полно уловить области возможного резкого изменения градиентов давления, установить пронумерованные датчики, подобрать длину соединительной трубки и уложить трубки таким образом, чтобы исключить перекрытия и заломы. Кроме того, необходимо проверить все соединения от дренажного отверстия до измерительных датчиков на герметичность, а также проверить сами дренажные отверстия на продуваемость.

Перед началом проведения экспериментальных исследований следует провести поверку датчиков измерения по показаниям жидкостного микроманометра. Данная методика проведения поверки наиболее детально описана в работах Лозинского Э.А. [45], Зубенко А.В. [10].

При дренажных экспериментальных исследованиях предусматривается определение локальных коэффициентов ветрового давления в 25 точках по пирамидальным градирням и 30 точках по гиперболической градирне. Датчики располагаются по грани градирни по 5 и 6 штук на каждый ярус градирни. Испытуемая модель устанавливается на специально разработанный поворотный стол (рисунок 2.9) с предварительно нанесенной градусной шкалой.

Модель устанавливается таким образом, чтобы ветровой поток попадал на грань градирни. После проведения продувки и фиксации полученных данных в зависимости от формы испытуемой модели модель поворачивается на 15 градусов для двенадцатигранных моделей, на 18 градусов модель десятигранной формы и на 22.5 градуса модель восьмигранной формы с последующей продувкой и фиксацией полученных данных. Продувки и фиксация данных продолжаются до достижения грани с установленными датчиками до отметки 180 градусов или оси симметрии модели.

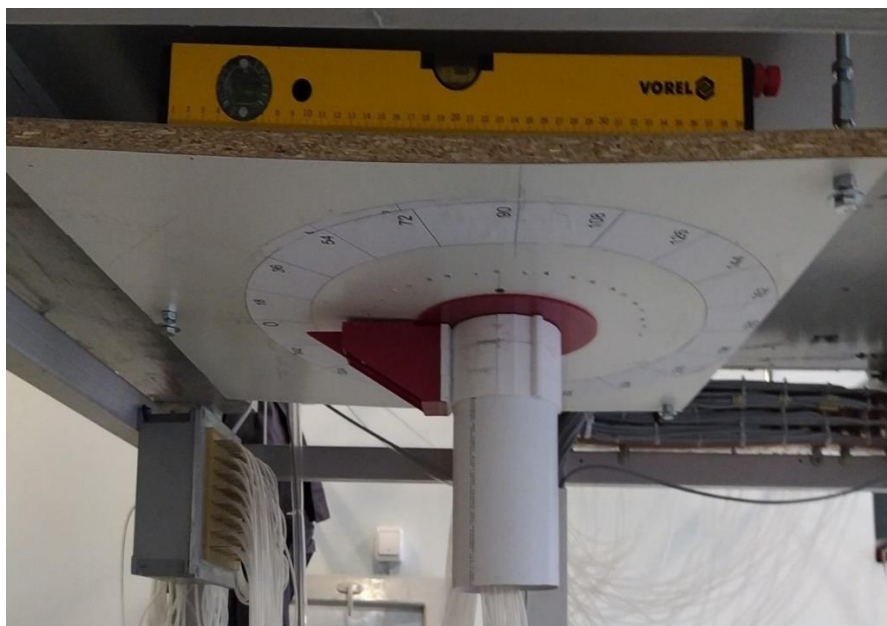


Рисунок 2.9 – Поворотный стол

В данной работе выполнены исследования воздействия ветрового потока в период эксплуатации и на определенных этапах возведения данных сооружений. В летний период эксплуатации башенные металлические градирни эксплуатируются с открытыми подкрылками, расположенными у основания вытяжной трубы. В зимний период, когда температура окружающей среды ниже нуля, данные подкрылки находятся в закрытом положении. Исходные модели башенных металлических градирен выполняются с открытыми подкрылками, но для оценки влияния ветрового потока в зимний период эксплуатации окна продувки заклеивались и проводились аэродинамические испытания от 0 до 180 градусов с фиксацией экспериментальных данных при каждом повороте модели.

Для оценки влияния ветрового потока на монтажные стадии испытываемые модели выполняются сборно-разборными. Модели разделяются по ярусам, каждая градирня выполняется из карт, замкнутых в ярус. Монтажной стадией является замыкание карт каждого из ярусов в каждом ярусе; в зависимости от модели в сечении карты установлено от 5 до 6 датчиков измерения локального аэродинамического коэффициента, что при обработке данных позволит установить распределение ветрового давления в сечении карт, где установлены датчики. Продувки модели проводятся при удалении каждого яруса аналогично, как и для

модели в эксплуатационной стадии с предварительным удалением из модели подкрылков, так как монтаж подкрылков производится на завершающем этапе строительства.

После проведения экспериментальных исследований влияния ветрового деления на внешний контур вытяжной трубы испытуемых моделей датчики переустанавливают в те же дренажные отверстия для исследования распределения ветрового воздействия по внутреннему контуру вытяжной башни. Порядок и этапность проведения экспериментальных исследований внутреннего контура является аналогичным исследованиям, проводимым по наружному контуру.

2.7.3 Программа проведения визуализации ветрового потока

Выполнение визуализации ветрового потока позволяет наиболее точно оценить характер течения ветрового потока у приграничных участков испытуемой модели и за ее пределами. Наиболее распространенными методами визуализации является метод велосиметрии (метод лазерного ножа) и метод шелковинок.

Метод лазерного ножа — это когда подается воздух, засеянный трейсерами (в данном случае глицерин с водой). Эта жидкость через специальное сопло, расположенное на определенном расстоянии от испытуемой модели, распыляется в пространстве аэродинамической трубы и подхватывается ветровым потоком. Для того, чтобы посмотреть течение воздуха, мы используем лазерный нож. Лазер с помощью линзы разворачивается в луч и тем самым мы видим поток в какой-то определенной плоскости сечения лазера. Для визуализации ветрового потока в горизонтальной плоскости лазерный нож фиксируется на разработанной и изготовленной раме из труб (рисунок 2.10) за пределами области течения ветрового потока.

Штанга, на которую устанавливается лазерный нож, выполнена подвижной для настройки высоты плоскости сечения лазерного ножа. Плоскость сечения лазерного ножа настраивается с помощью лазерного уровня. Для визуализации ветрового потока в вертикальной плоскости лазерный нож крепится на специальном приспособлении на потолке лаборатории. Для проведения

видеофиксации и работы лазерного ножа в вертикальном положении было принято решение установить в верхней части трубы дополнительное смотровое окно из стекла толщиной 14мм (рисунок 2.11).



Рисунок 2.10 – Рама для установки и выверки плоскости сечения лазерного ножа.

Данные приспособления и дополнительные смотровые окна позволяют с максимальной точностью настроить лазерный нож и провести фото и видео фиксацию получаемых эффектов.

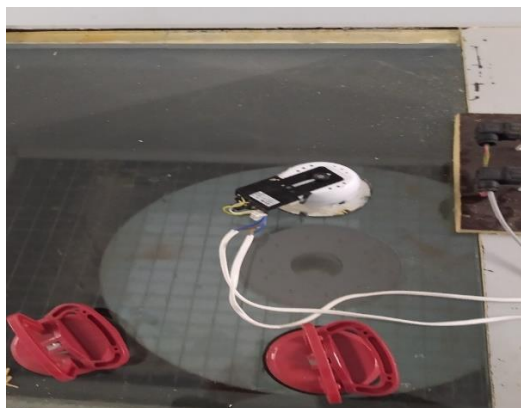


Рисунок 2.11 – Смотровое окно в верхней части аэродинамической трубы МАТ-1

Метод шелковинок — это метод, позволяющий оценить направление ветрового потока, оценить амплитуду вихревого возбуждения и направление закручивания вихрей. К испытуемой модели в исследуемых областях прикрепляются тончайшие нити «шелковинок» (в нашем случае это синтетические люминесцентные волоски). На рисунке 2.12 представлена модель с предварительно закрепленными шелковинками.



Рисунок 2.12 – Испытуемая модель, установленная в аэродинамической трубе МАТ-1 с прикрепленными люминесцентными шелковинками

Для оценки амплитуды вихревого возбуждения разработана люминесцентная сетка с ячейкой 5x5 см которая также используется при проведении экспериментальных исследований с лазерным ножом.

2.8 Методика расчета ветровых воздействий на сооружения, и комплексы на основе численного решения

Численные решения задач аэродинамики широко распространены в инженерных кругах и позволяет сократить время и ресурсы на проведение экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. Зачастую на первых этапах планирования проведения экспериментальных исследований проводятся численные исследования предполагаемых моделей перед изготовлением опытных образцов. Численные исследования на первых этапах позволяют выбрать наиболее рациональный масштаб испытуемых моделей, провести предварительную оценку влияния ветрового потока и обтекания ветровым потоком численной модели, а также определить на предварительном этапе схему расположения отверстий под проведение дренажных экспериментов.

Оценка получаемых данных численными методами возможна лишь после проведения ряда экспериментов в аэродинамических трубах и сопоставления полученных данных с численными «верификация». При проведении верификации полученных данных в аэродинамической трубе с численными исследованиями

разница должна составлять не более 10%. Зачастую в верификации участвуют наиболее характерные участки модели с повышенным градиентом ветрового давления.

Расчетные модели должны быть идентичны продуваемым моделям в аэродинамической трубе. В расчетный комплекс вносятся все параметры модели от ее геометрической формы до материала, из которого изготовлена испытываемая модель. Данные требования называются начальными условиями математической модели. Также в расчетный комплекс вносятся параметры аэродинамической трубы, такие как продуваемый объем, температура ветрового потока. Граничные условия математической модели — это характер распределения ветрового потока по сечению трубы, интенсивность турбулентности набегаемого потока. Граничными условиями являются задания стенок аэродинамической трубы как ограничение объема со скольжением вдоль заданного объема ветрового потока.

2.8.1 Выбор базового программного обеспечения

На данный момент времени существует множество программных комплексов для проведения численных аэродинамических исследований. Наиболее востребованными в строительной отрасли являются такие программные комплексы как ANSYS Fluent, ANSYS Flow Simulation, ANSYS CFD, Solidworks Flow Simulation, Autodesk CFD. У перечисленных программных комплексов функциональная база, и самое главное, теоретическая база одинаковы. Пользователь данных комплексов оперирует удобством интерфейса и возможностью визуализации получаемых данных. В данной работе применяется расчетный комплекс Autodesk CFD.

2.8.2 Выбор обоснованной верификационной задачи

Верификация математической модели в данной работе проводится критериям распределения локальных аэродинамических коэффициентов ветрового давления в местах установки датчиков по ярусам, и сопоставление данных

визуализации обтекания ветровым потокам по заданным сечениям с картиной обтекания в тех же сечениях в математической модели.

Данная задача рассматривается в нестационарном режиме решения шаговым методом, где время, за которое ветровой поток обтекает испытываемую модель, делится на определенные интервалы времени, то есть на доли секунды. Данная задача позволяет наиболее полно оценить математически характер обтекания и сопоставить полученные математические решения с экспериментальными.

2.9 Выводы по разделу 2

1. Выполнено обоснование программы и методики экспериментальных исследований. На основе экспериментальной верификации с известными коэффициентами полного давления C_x 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, при котором число Рейнольдса составляет $Re=2.71 \times 10^5$.

2. Разработана выборка испытываемых моделей с учетом сезонной работы башенных металлических градирен площадью орошения до 1600 м^2 и последовательности возведения. Которая 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.

3. На основе численного анализа выполнена схема расстановка датчиков пониженного давления с учетом последовательности возведения. Для проведения в последующем верификационных расчетов.

РАЗДЕЛ III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОБТЕКАНИЯ БМГ ВЕТРОВЫМ ПОТОКОМ

3.1 Анализ влияния ветрового потока на башенную двенадцатигранную градирню гиперболической формы

После проведения тензометрических испытаний и определения оптимальных скоростей ветрового потока проводились дренажные испытания для нахождения локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему и внутреннему контуру каждого яруса выбранного типа ряда башенных металлических градирен. На рисунке 3.1 представлена уточненная модель башенной металлической каркасно-обшивной градирни гиперболической формы с числом граней в плане 12 в масштабе 1:180 с соблюдением геометрического критерия подобия. Данная модель выполнена с открытыми подкрылками у основания вытяжной башни и отражает эксплуатацию данного сооружения в летний период времени.

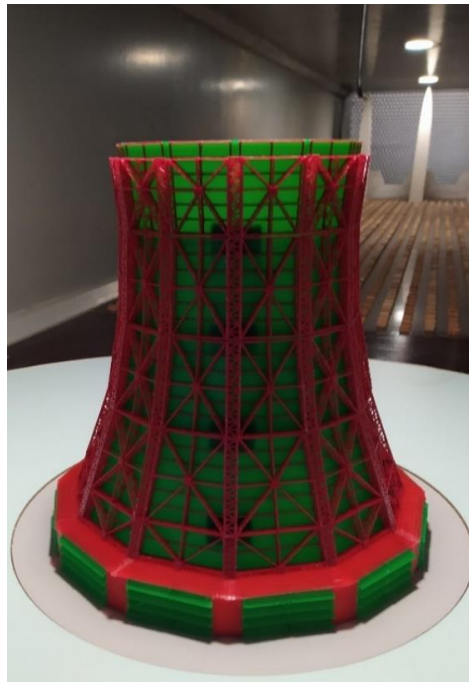


Рисунок 3.1 – Макет башенной металлической градирни гиперболической формы площадью орошения 1600м^2 , расположенный в рабочей части МАТ-1 (летний период эксплуатации)

На рисунке 3.2. представлены сводные график распределения C_{pi} по внешнему контуру двенадцатигранной каркасно-обшивной гиперболической градирни при направлении ветра на грань. Приведенные сводные графики

распределения аэродинамических коэффициентов по пяти ярусам наиболее характерно отражают картину обтекания ветровым потоком данного сооружения. Рисунок 3.2 с максимальными значениями отражает пульсационную составляющую при сходе вихря. На графике максимальное значение активного давления составило +2 минимальное -2,2 и представляет собой область, в которой образуется и в последующем сходит вихрь. Протяженность области отрицательного давления составляет 37 градусов; от 38 до 75 градусов присутствуют характерные отклонения от нормального распределения при сравнении с распределением ветрового давления для цилиндра, что не отражается в нормах [6,7].

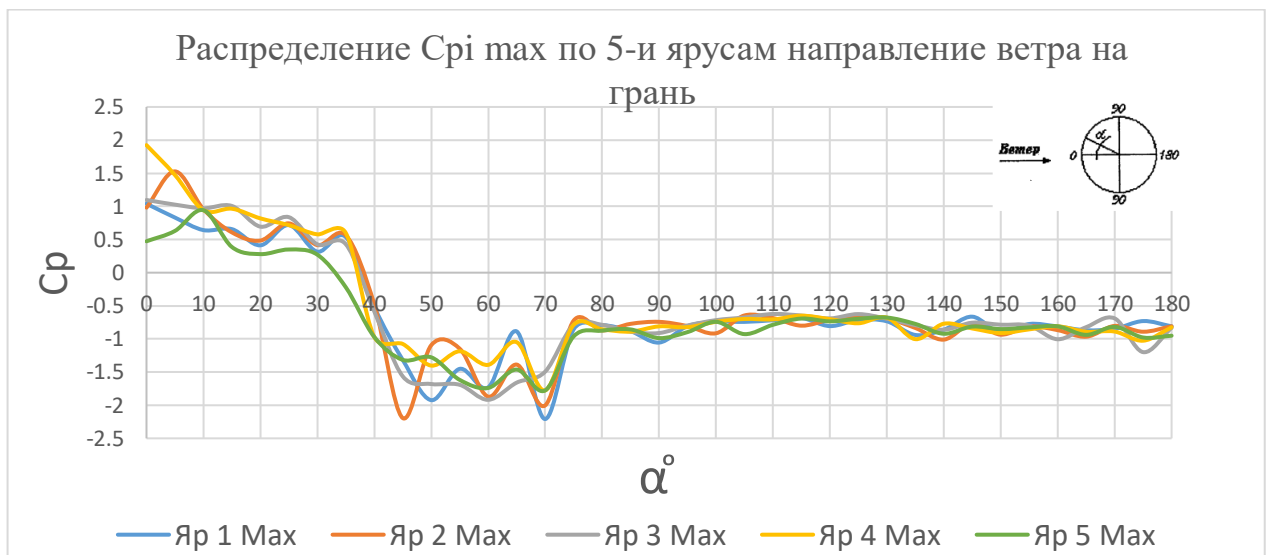


Рисунок 3.2 – Распределение $C_{p1\ max}$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (летний период эксплуатации)

Для данного вида сооружений регламентируется проведение продувок в аэродинамической трубе на грань и на ребро БМГ. На рисунке 3.3 приведены результаты проведенного экспериментального исследования при набегании ветрового потока на ребро. Зона активного давления находится в промежутке от 0 до 53 градусов с максимальным значением локального коэффициента +1,57. Область схода вихря с максимальным отрицательным давлением -2,49 находится в промежутке от 53 до 90 градусов.

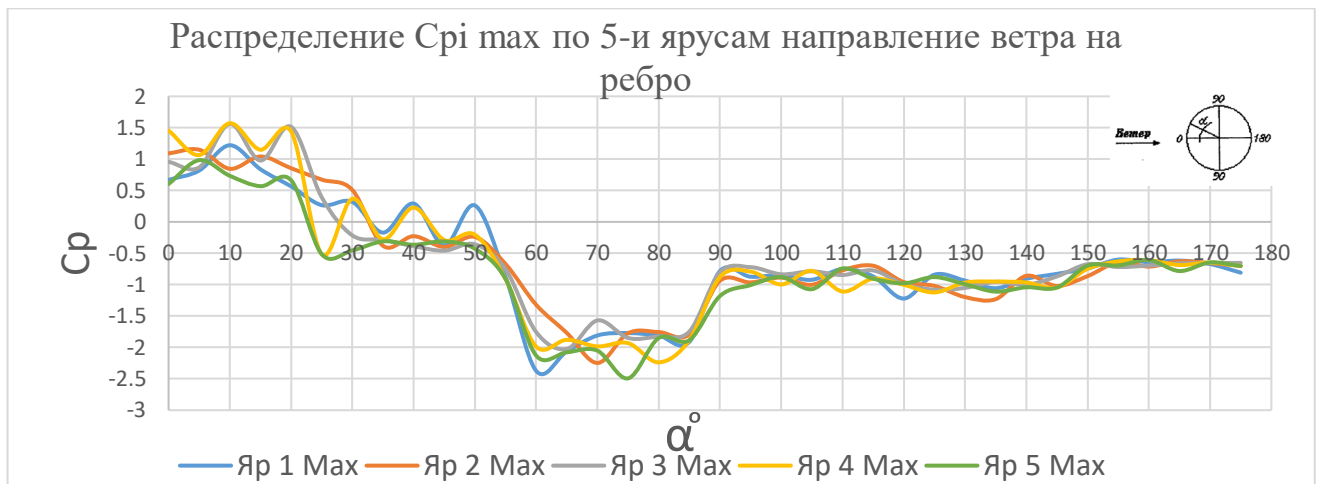


Рисунок 3.3 – Распределение $C_{p1} \max$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на ребро (летний период эксплуатации)

При проведении экспериментальных исследований также проводились измерения показателей локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру БМГ. Графики распределения локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру представлены в приложении В.

В приложении В на рисунке В.3, В.5 представлены графики распределения внутреннего давления по контуру обшивки градирни. Согласно требованиям норм проектирования [6,7] при проектировании башенных металлических градирен данный коэффициент принимается равным 0.5 при эксплуатации в летний период времени и 0.8 при эксплуатации в зимний период времени. По полученным экспериментальным данным на рисунке В.3б осредненный аэродинамический коэффициент по контуру обшивки колеблется в районе 0,5. Следовательно, в нормах [6,7] приведен осредненный показатель аэродинамических коэффициентов. Но с учетом пульсационной составляющей по экспериментальным данным при продувке на грань коэффициент колеблется от 0,5 до 1,1 (рисунок В.3а) для летнего периода эксплуатации и на ребро от 0.5 до 1,4 (рисунок В.5а).

В нормативных документах регламентируется сезонность работы БМГ применением локального аэродинамического коэффициента внутреннего давления равным 0.8. Зимний период эксплуатации отличается от летнего тем, что в зимний период времени окна, через которые поступает воздух, закрываются для уменьшения ветрового потока, который приводит к активному обледенению

конструкций оросителя. С учетом данной особенности также проводились аэродинамические продувки разработанной модели в трубе (приложение В рисунок В.6). На рисунке В.7а представлено распределение локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему контуру БМГ в зимний период времени с набеганием ветрового потока на грань. Показатели C_{pi} в зимний период эксплуатации не превышают показатели летнего режима работы; также неизменными остались области активного отрицательного давления при сходе вихря. При продувке на ребро (рисунок В.9а) отсутствует зона схода вихря, но неизменным остается область активного давления, которая также не превышает показатели летнего периода.

Осреднённые показатели локальных аэродинамических коэффициентов внутреннего давления колеблется в пределах 0,8 (рисунок В.8б, В.10б), что также соответствует значению, приведённому в нормативных документах. Максимальные значения по экспериментальным данным при продувке на грань колеблются от 0,56 до 2,32 (рисунок В.8а) при продувке на ребро от 0,5 до 1,4 в зимний период времени (рисунок В.10а)

Проведены экспериментальные исследования влияния ветрового потока на этапах возведения БМГ на модельный ряд, представленный ранее на рисунке 2.11. Описание каждой из стадий представлено в таблице 2.3.

Выявлена монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса БМГ (рисунок 3.4) с нехарактерным распределением локальных аэродинамических коэффициентов, отличающаяся от распределения в стадии эксплуатации. Для области активного давления от 0 до 38 градусов с максимальным локальным коэффициентом +2,43, также наблюдается смещение зоны с пиковыми отрицательными значениями. Область схода вихря находится от 70 до 105 градусов с максимальным значением локального коэффициента – 3,8, что на 50 % превышает значение максимального коэффициента при стадиях эксплуатации. Распределение пикового давления по внутреннему контуру (рисунок В.13а) колеблется от 0,25 до 2,6. Осреднённые показатели давления внутреннего контура колеблется в пределах 0,5 (рисунок В.13б). Стадии монтажа при замыкании карт от первого до третьего

ярусов имеют такой же характер распределения, как и у монтажной стадии номер четыре, но в значительной мере меньшими показателями локальных аэродинамических коэффициентов.

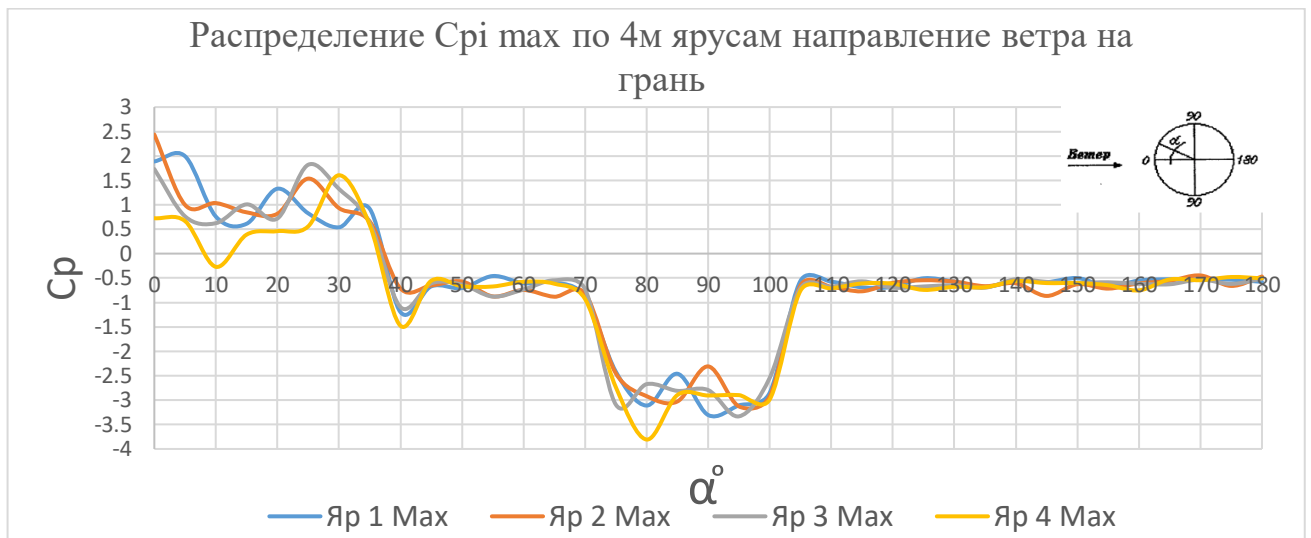




Рисунок 3.4 – Распределение C_p max по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса)

Предлагаемые графики для данного вида сооружений, представленные в нормативных документах [3,6–9] сглажены и не имеют подобных отклонений, которые наблюдаются в отрицательной области пиковых значений при сходе вихря. При первом рассмотрении данного явления можно оценить данные отклонения как ошибку. Но проведя визуализацию потока с высокоскоростной видеофиксацией и дальнейшей раскадровкой полученного видео обнаруживаем, что становится понятна природа появления данных отклонений. При зарождении большого вихря и до его отрыва от грани модели поверх большого вихря происходит сход трех маленьких вихрей, которые видны на рисунке 3.2 максимальных значений в виде минимумов на отрезке от 38 до 75 градусов при пульсации.

Для оценки характера течения ветрового потока вблизи модели и выбора теории обтекания тела выполнено экспериментальное исследование методом велосиметрии или теньвым методом, результаты которого приведены на рисунках 3.5-3.8.

Данным методом определялся характер обтекания башенной металлической гиперболической градирни. На рисунке 3.5 приведено обтекание ветровым потоком градирни относительно плоскости XOZ с образованием малого вихря за моделью. На рисунке 3.6 также приведено обтекание относительно плоскости XOZ , но в данном случае анализируется сама работа данного сооружения, так как у горловины трубы образуется повышенное разрежение, происходит подсос дыма через нижние окна башни. На рисунке 3.7 приведена визуализация ветрового потока относительно плоскости XOY , где отчетливо видно образование большого вихря позади модели.

	
<p>Рисунок 3.5 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости XOZ, подача дыма на вытяжную башню</p>	<p>Рисунок 3.6 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости XOZ, подача дыма по низу башни</p>

На рисунке 3.8 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 образование большого вихря позади объекта с частотой схода 2.66 Гц. 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. Выборка рисунков с характером обтекания БМГ приведена в приложении Г.

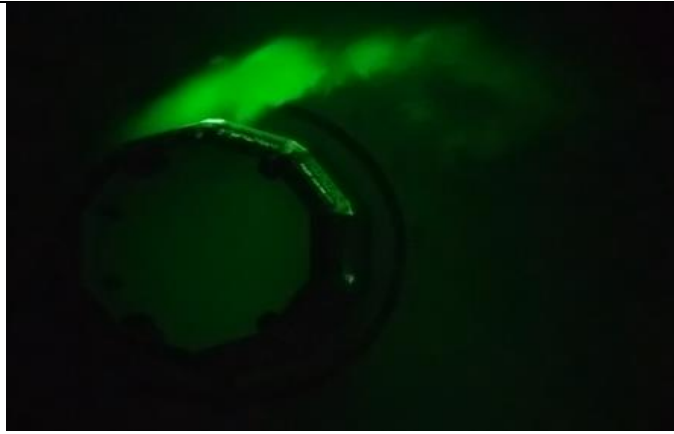


Рисунок 3.7 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости ХОУ, подача дыма на вытяжную башню

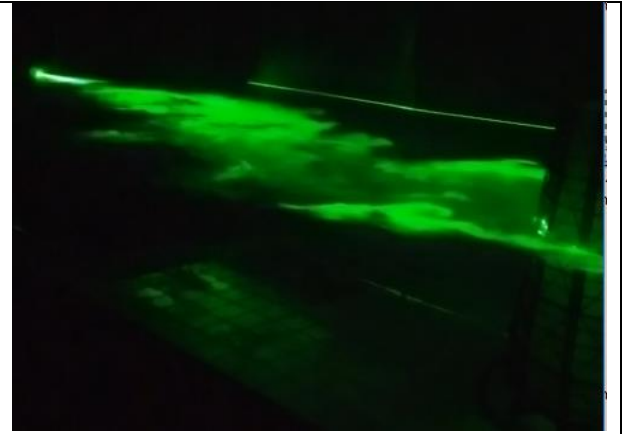


Рисунок 3.8 – Визуализация обтекания ветрового потока изометрия, подача дыма на вытяжную башню

Также при визуализации ветрового потока использован метод шелковинок, приведенный на рисунках 3.9, 3.10. Данный метод позволил оценить характер течения вокруг модели, амплитуду больших вихрей и направление закручивания вихрей. Но этот метод зарекомендовал себя менее эффективным, чем метод лазерного ножа и в последующих испытаниях моделей не применялся.

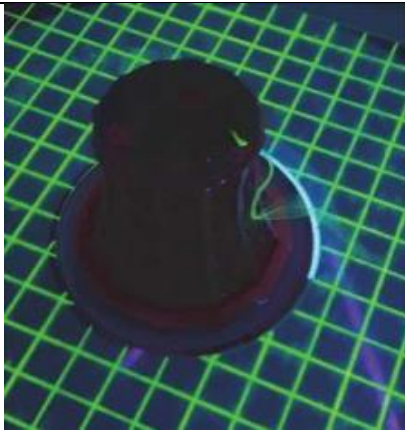


Рисунок 3.9 – Метод шелковинки с применением люминесцентной нити и специально разработанной градуированной сети.



Рисунок 3.10 – Метод шелковинки с применением нитей без учета градуированной сети.

3.2 Анализ влияния ветрового потока на башенную двенадцатигранную градирню пирамидальной формы

Проведены дренажные испытания для нахождения локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему и внутреннему контуру каждого

яруса башенной градирни. На рисунке 3.11 представлена уточненная модель башенной металлической каркасно-обшивной градирни пирамидальной формы с числом граней в плане 12 в масштабе 1:180 с соблюдением геометрического критерия подобия. Данная модель выполнена с открытыми подкрылками у основания вытяжной башни и отражает период эксплуатации данного сооружения в летний период времени.



Рисунок 3.11 – Макет башенной металлической двенадцатигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600 м^2 , расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)

На рисунке 3.12. представлены сводные график распределения C_{pi} по внешнему контуру двенадцатигранной каркасно-обшивной градирни пирамидальной формы с направлением ветра на грань. Приведенные сводные графики распределения аэродинамических коэффициентов по пяти ярусам наиболее характерно отражают картину обтекания ветровым потоком данного сооружения. Рисунок 3.12 с максимальными значениями отражает пульсационную составляющую при сходе вихря. На графике максимальное значение активного давления составило $+1,41$ минимальное $-1,8$ представляет собой область, в которой образуется и в последующем сходит вихрь. Протяженность области отрицательного давления составляет 10 градусов от 38 до 58 градусов присутствуют характерные отклонения от нормального распределения при

сравнении с распределением ветрового давления с цилиндром, которые не отражаются в нормах [6,7].

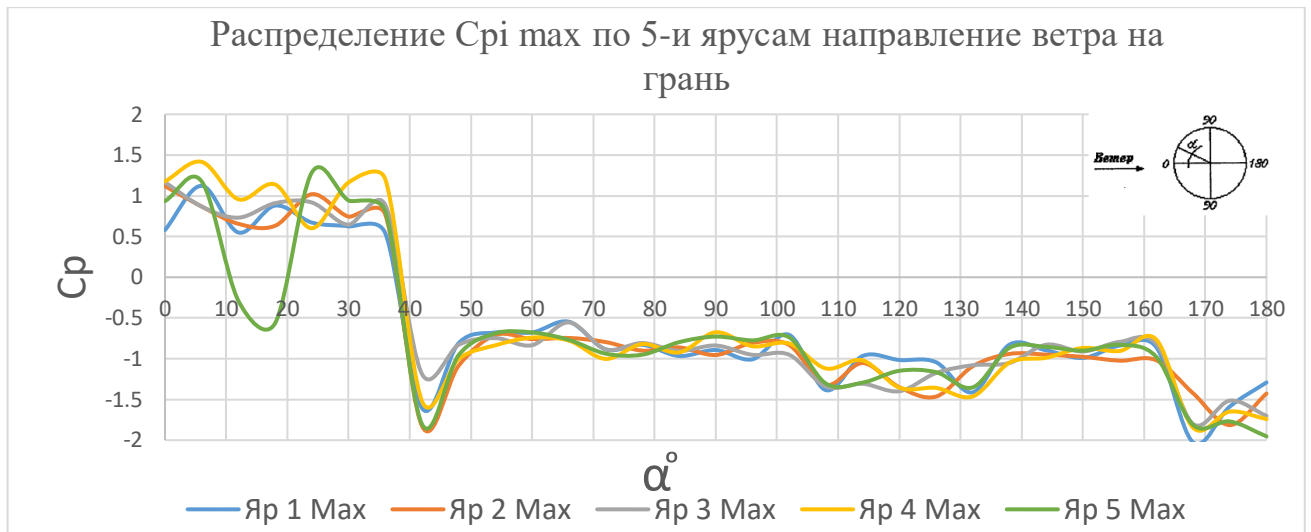


Рисунок 3.12 – Распределение C_{p_i} max по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (летний период эксплуатации)

Для данного вида сооружений регламентируется проведение продувок в аэродинамической трубе на грань и на ребро БМГ. На рисунке 3.13 приведены результаты проведенного экспериментального исследования при набегании ветрового потока на ребро. Зона активного давления находится в зоне от 0 до 20 градусов с максимальным значением локального коэффициента +1,08. Область схода вихря с максимальным отрицательным давлением -2,17 находится от 48 до 90 градусов. Также наблюдается область, в которой появляется малый вихрь протяженность области 29 градусов, на графике данная область лежит от 20 до 49 градусов. На протяжении всего времени показатель давления стабильно с отрицательным давлением.

При проведении экспериментальных исследований также проводились измерения показателей локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру БМГ. Графики распределения локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру представлены в приложении В.

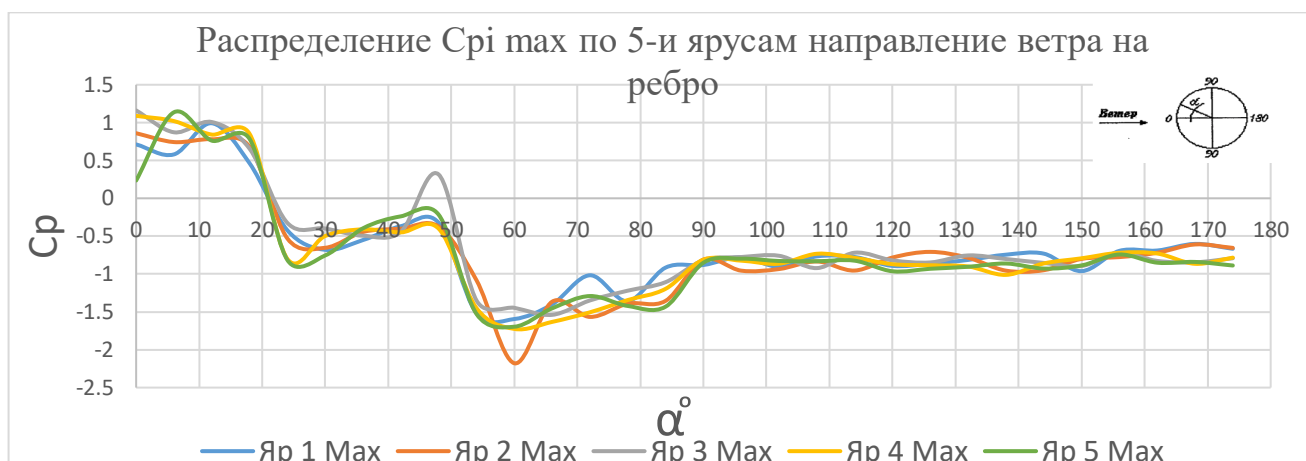


Рисунок 3.13 – Распределение $C_{pi} \max$ по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро (летний период эксплуатации)

В приложении В на рисунке В.18, В.20 представлены графики распределения внутреннего давления по контуру обшивки градирни. Согласно норм проектирования [6,7] при проектировании башенных металлических градирен данный коэффициент принимается равным 0.5 при эксплуатации в летний период времени и 0.8 при эксплуатации в зимний период времени. По полученным экспериментальным данным на рисунка В.18б осредненный аэродинамический коэффициент по контуру обшивки колеблется в районе 0,5 от 0,5 до 0,83. Следовательно в нормах [6,7] приведен осредненный показатель аэродинамических коэффициентов. Но с учетом пульсационной составляющей по экспериментальным данным при продувке на грань коэффициент колеблется от 0,5 до 1,1 (рисунок В.18а) для летнего периода эксплуатации и на ребро от 0.69 до 1,7 (рисунок В.20а).

В нормативных документах регламентируется сезонность работы БМГ применением локального аэродинамического коэффициента внутреннего давления равным 0.8. Зимний период эксплуатации отличается от летнего тем, что в зимний период времени окна через которые поступает воздух закрываются для уменьшения ветрового потока который приводит к активному обледенению конструкций оросителя. С учетом данной особенности также проводились аэродинамические продув в трубе разработанной модели (приложение В рисунок В.21). На рисунке В.22а представлено распределение локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему контуру БМГ в зимний период времени с набегания

ветрового потока на грань. Показатели C_{pi} в зимний период эксплуатации не превышают показатели летнего режима работы. При продувке на ребро рисунок В.24а отсутствует ярко вырожденная зона схода вихря, но неизменным остается область активного давления, которая также не превышает показатели летнего периода.

Осреднённые показатели локальных аэродинамических коэффициентов внутреннего давления колеблется в пределах 0,8 (рисунок В.23б, В.25б), что также соответствует значению, приведённому в нормативных документах. Максимальные значения по экспериментальным данным при продувке на грань колеблется от 0,89 до 1,98 (рисунок В.23а) при продувке на ребро от 0,83 до 2,1 в зимний период времени (рисунок В.25а)

Проведены экспериментальные исследования влияния ветрового потока на этапах возведения БМГ на модельный ряд, представленный ранее на рисунке 2.10 описание каждой из стадий представлено в таблице 2.3.

Выявлена монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса БМГ (рисунок 3.14) с нехарактерным распределением локальных аэродинамических коэффициентов, отличающаяся от распределения в стадии эксплуатации. Область активного давления от 0 до 38 градусов с максимальным локальным коэффициентом +1.01, также наблюдается смещение области с пиковыми отрицательными значениями. Область схода вихря находится от 40 до 65 градусов с максимальным значением локального коэффициента -1,19. При анализе экспериментальных данных распределения C_{pi} по наружному контуру с учетом монтажных стадий не выявлено значений, превышающих эксплуатационные стадии, но наблюдается смещение областей активного и пассивного давления. Распределение пикового давления по внутреннему контуру (рисунок В.28а) колеблется от 0.41 до 4.5. Осреднённые показатели давления внутреннего контура колеблется в пределах 0,5 (рисунок В.28б). Стадии монтажа при замыкании карт от первого до третьего ярусов имеют такой же характер распределения, как и у монтажной стадии четыре, но в значительной мере меньшими показателями локальных аэродинамических коэффициентов.

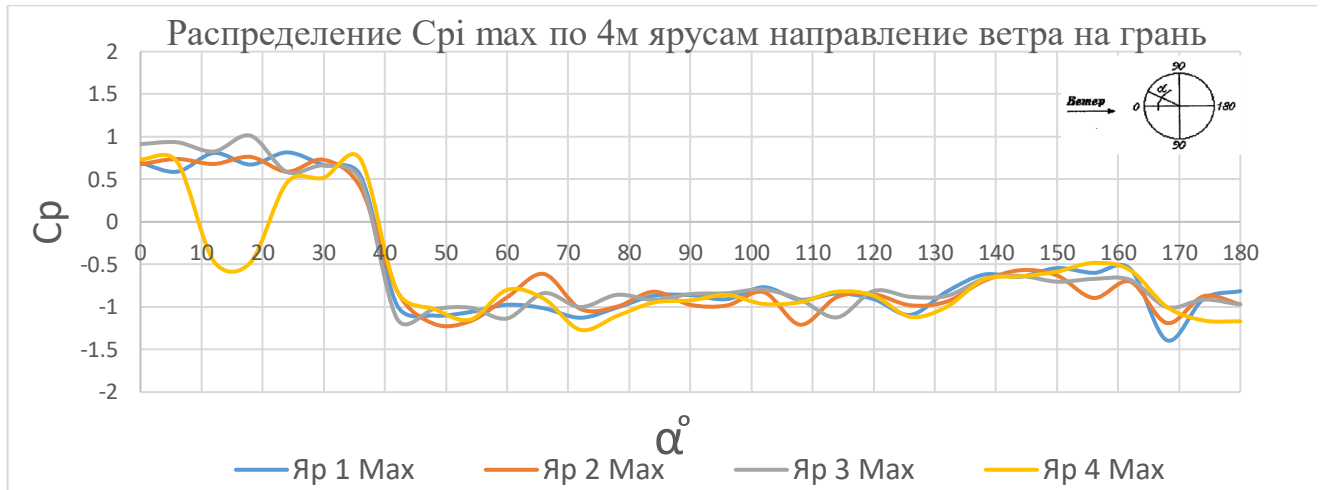


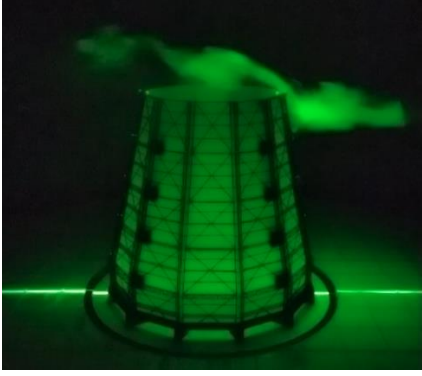
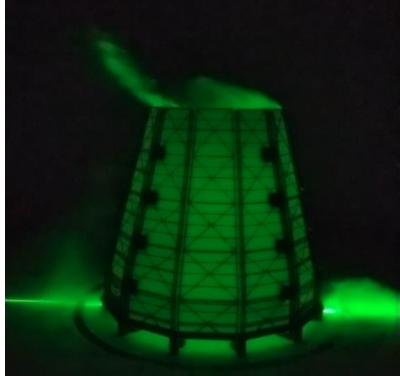
Рисунок 3.14 – Распределение $C_{p1} \max$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса)

Предлагаемые графики для данного вида сооружений представленные в нормативных документах [3,6–9] сглаженные и не имеют подобных отклонений которые наблюдаются в отрицательной области пиковых значений при сходе вихря. При первом рассмотрении данного явления можно оценить данные отклонения как ошибку. Но проведя визуализацию потока с высокоскоростной видеофиксацией и дальнейшей раскадровкой полученного видео становится понятна природа появления данных отклонений. При зарождении большого вихря и до его отрыва от грани модели поверх большого вихря происходит сход трех маленьких вихре которые видны на рисунке 3.2 максимальных значений в виде минимумов на отрезке от 38 до 58 градусов при пульсации.

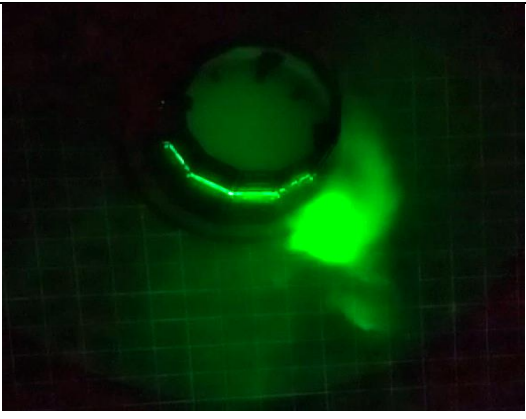
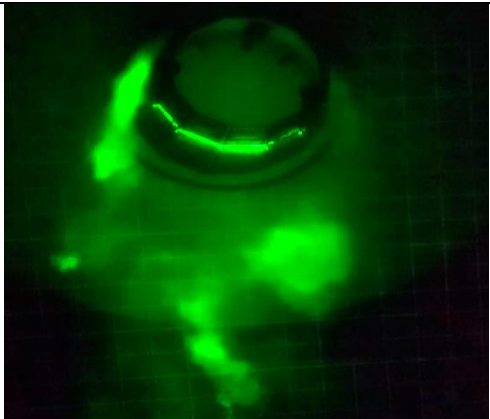
Для оценки характера течения ветрового потока вблизи модели и выбора теории обтекания тела выполнено экспериментальное исследование теньвым методом, результаты которого приведены на рисунках 3.15-3.18.

Данным методом определялся характер обтекания башенной металлической двенадцатигранной градирни пирамидальной формы. На рисунке 3.15 приведено обтекание ветровым потоком градирни относительно плоскости XOZ с образованием малого вихря за моделью. На рисунке 3.16 также приведено обтекание относительно плоскости XOZ , но в данном случае анализируется сама работа данного сооружения, так как у горловины трубы образуется повышенное разрежение, происходит подсос дыма через нижние окна башни. На рисунке 3.17

приведена визуализация ветрового потока относительно плоскости XOY , где отчетливо видно образование большого вихря позади модели.

	
<p>Рисунок 3.15 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости XOZ, подача дыма на вытяжную башню</p>	<p>Рисунок 3.16 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости XOZ, подача дыма по низу башни</p>

На рисунке 3.8 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 с частотой схода 2.82 Гц.

	
<p>Рисунок 3.17 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости XOY, подача дыма на вытяжную башню</p>	<p>Рисунок 3.18 – Визуализация обтекания ветрового потока изометрия, подача дыма на вытяжную башню</p>

Исходя из анализа характера обтекание 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. Выборка рисунков с характером обтекания БМГ приведена в приложении Г.

3.3 Анализ влияния ветрового потока на башенную десятигранную градирню пирамидальной формы

Проведены дренажные испытания для нахождения локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему и внутреннему контуру каждого яруса башенной градирни. На рисунке 3.19 представлена уточненная модель башенной металлической каркасно-обшивной градирни пирамидальной формы с числом граней в плане 10 в масштабе 1:180 с соблюдением геометрического критерия подобия. Данная модель выполнена с открытыми подкрылками у основания вытяжной башни и отражает период эксплуатации данного сооружения в летний период времени.

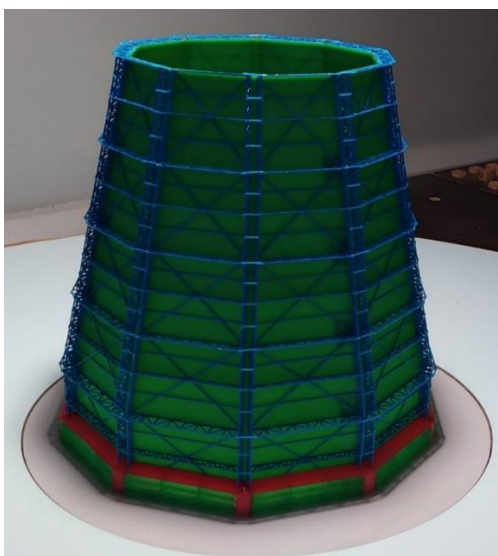


Рисунок 3.19 – Макет башенной металлической десятигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м^2 , расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)

На рисунке 3.20 представлены сводные график распределения C_{pi} по внешнему контуру десятигранной каркасно-обшивной пирамидальной формы градирни направление ветра на грань. Приведенные сводные графики распределения аэродинамических коэффициентов по пяти ярусам наиболее характерно отражают картину обтекания ветровым потоком данного сооружения.

Рисунок 3.20 с максимальными значениями отражает пульсационную составляющую при сходе вихря. На графике максимальное значение активного давления составило +1,77 протяженность области активного давления от 0 до 46 градусов. Максимальное значение отрицательного давления составило -3,14 и представляет собой область, в которой образуется и в последующем сходит вихрь. Протяженность области отрицательного давления составляет 14 градусов от 46 до 60 градусов присутствуют характерные отклонения от нормального распределения при сравнении с распределением ветрового давления с цилиндром, которые не отражаются в нормах [6,7]. Также наблюдается всплеск отрицательного давления в области, лежащей от 90 до 130 градусов. Проведя визуализацию ветрового потока данный всплеск объясним вкладом от отрыва вихря и с последующим его развитием до большого вихря позади модели. Данный вихрь подпитуется вихрями, образующимися за счет работы сооружения, и наблюдается только при работе сооружения в летний период времени. В зимний период времени данный всплеск отсутствует.

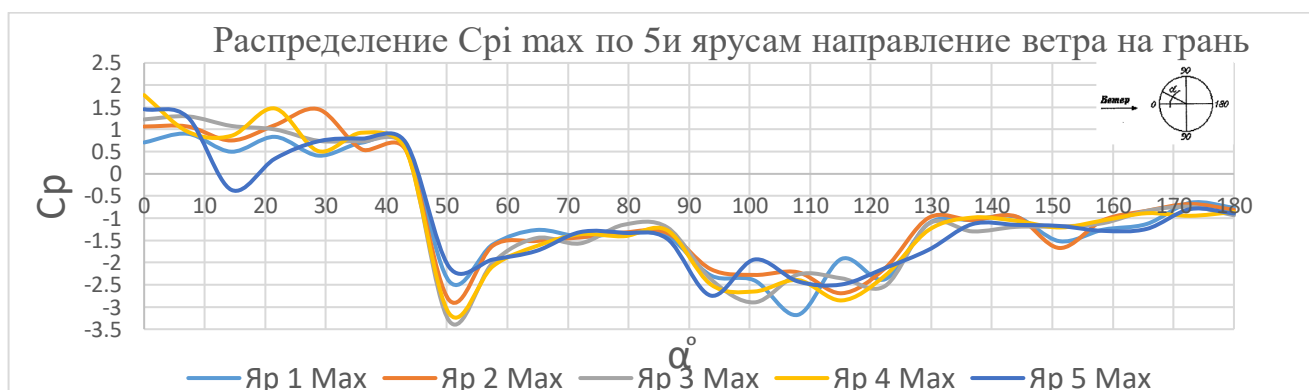


Рисунок 3.20 – Распределение $C_{p1} \max$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (летний период эксплуатации)

Для данного вида сооружений регламентируется проведение продувок в аэродинамической трубе на грань и на ребро БМГ. На рисунке 3.21 приведены результаты проведенного экспериментального исследования при на бегании ветрового потока на ребро. Зона активного давления находится от 0 до 12 градусов с максимальным значением локального коэффициента +1,97. Область схода вихря с максимальным отрицательным давлением -4.21 находится от 12 до 58 градусов.

При проведении экспериментальных исследований также проводились измерения показателей локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру БМГ. Графики распределения локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру представлены в приложении В.

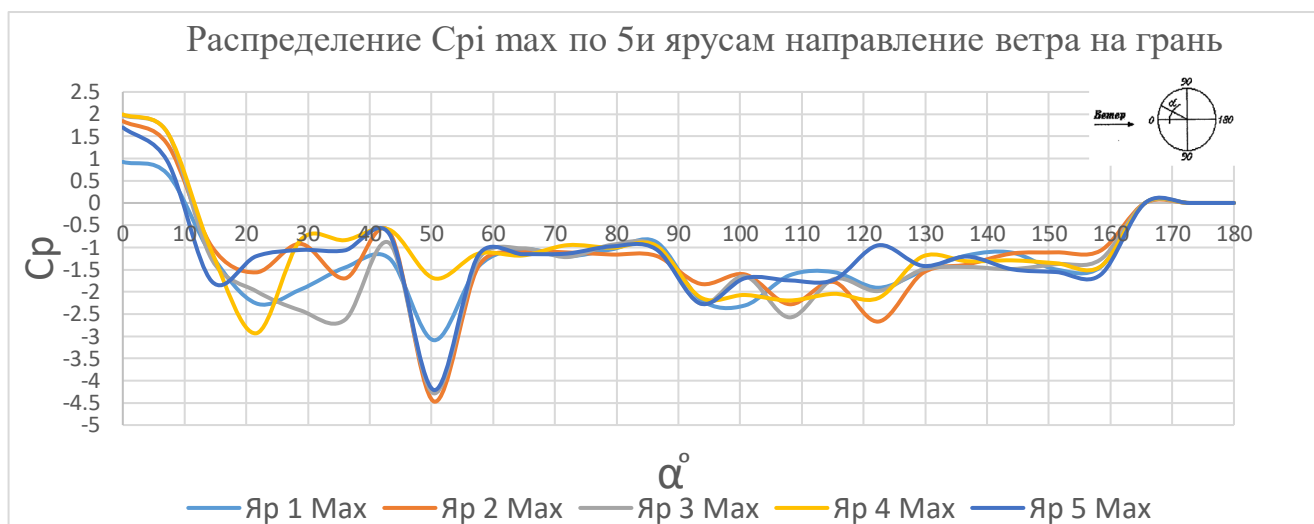


Рисунок 3.21 – Распределение $C_{p1} \max$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на ребро (летний период эксплуатации)

В приложении В на рисунке В.33, В.35 представлены графики распределения внутреннего давления по контуру обшивки градирни. Согласно норм проектирования [6,7] при проектировании башенных металлических градирен данный коэффициент принимается равным 0.5 при эксплуатации в летний период времени и 0.8 при эксплуатации в зимний период времени. По полученным экспериментальным данным на рисунка В.33б осредненный аэродинамический коэффициент по контуру обшивки колеблется в районе 0,5. Следовательно в нормах [6,7] приведен осредненный показатель аэродинамических коэффициентов. Но с учетом пульсационной составляющей по экспериментальным данным при продувке на грань коэффициент колеблется от 0,5 до 1,1 (рисунок В.33а) для летнего периода эксплуатации и на ребро от 0.21 до 2,09 (рисунок В.35а).

В нормативных документах регламентируется сезонность работы БМГ применением локального аэродинамического коэффициента внутреннего давления равным 0.8. Зимний период эксплуатации отличается от летнего тем что в зимний период времени окна через которые поступает воздух закрываются для уменьшения ветрового потока который приводит к активному обледенению

конструкций оросителя. С учетом данной особенности также проводились аэродинамические продувы в трубе разработанной модели (приложение В рисунок В.36). На рисунке В.37а представлено распределение локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему контуру БМГ в зимний период времени с набегания ветрового потока на грань. Показатели C_{pi} в зимний период эксплуатации не превышают показатели летнего режима работы также неизменными остались области активного, отрицательного давления при сходе вихря. При продувке на ребро рисунок В.39а отсутствует зона схода вихря, но неизменным остается область активного давления, которая также не превышает показатели летнего периода.

Осреднённые показатели локальных аэродинамических коэффициентов внутреннего давления колеблется в пределах 0,8 (рисунок В.38б, В.40б), что также соответствует значению, приведённому в нормативных документах. Максимальные значения по экспериментальным данным при продувке на грань колеблется от 0,88 до 2,81 (рисунок В.38а) при продувке на ребро от 0,71 до 1,73 в зимний период времени (рисунок В.40а)

Проведены экспериментальные исследования влияния ветрового потока на этапах возведения БМГ на модельный ряд, представленный ранее на рисунке 2.9 описание каждой из стадий представлено в таблице 2.3.

Выявлена монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса БМГ (рисунок 3.4) с нехарактерным распределением локальных аэродинамических коэффициентов, отличающаяся от распределения в стадии эксплуатации. Область активного давления от 0 до 46 градусов с максимальным локальным коэффициентом +1.45, также наблюдается смещение области с пиковыми отрицательными значениями. Область схода вихря находится от 46 до 92 градусов с максимальным значением локального коэффициента – 2,79, что не превышает значение максимального коэффициента при стадиях эксплуатации, но значительно увеличивается область образования и схода вихря. Распределение пикового давления по внутреннему контуру (рисунок В.43а) колеблется от 0.57 до 1.68. Осреднённые показатели давления внутреннего контура колеблется в пределах 0,5

(рисунок В.43б). Стадии монтажа при замыкании карт от первого до третьего ярусов имеют такой же характер распределения, как и у монтажной стадии четыре, но в значительной мере меньшими показателями локальных аэродинамических коэффициентов.

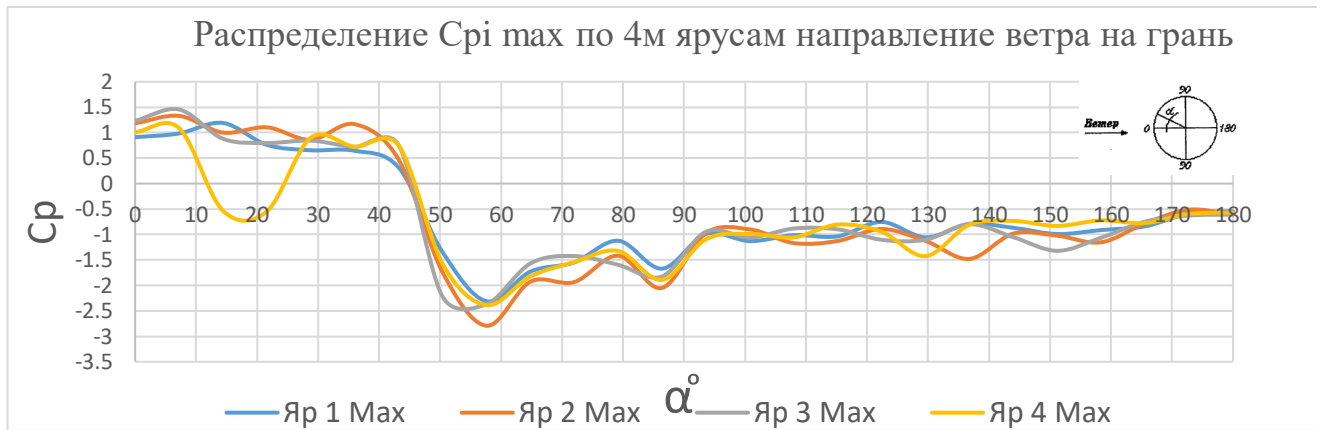


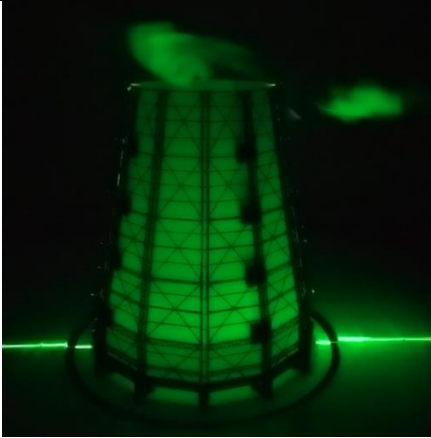
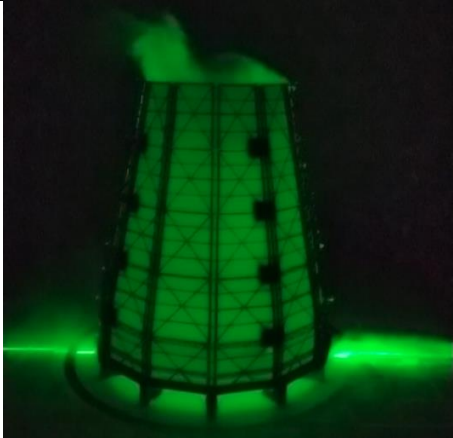
Рисунок 3.22 – Распределение $C_{p1 \max}$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса)

Предлагаемые графики для данного вида сооружений представленные в нормативных документах [3,6–9] сглаженные и не имеют подобных отклонений которые наблюдаются в отрицательной области пиковых значений при сходе вихря. При первом рассмотрении данного явления можно оценить данные отклонения как ошибку. Но проведя визуализацию потока с высокоскоростной видеофиксацией и дальнейшей раскадровкой полученного видео становится понятна природа появления данных отклонений. При зарождении большого вихря и до его отрыва от грани модели поверх большого вихря происходит сход трех маленьких вихре которые видны на рисунке 3.20 максимальных значений в виде минимумов на отрезке от 12 до 130 градусов при пульсации.

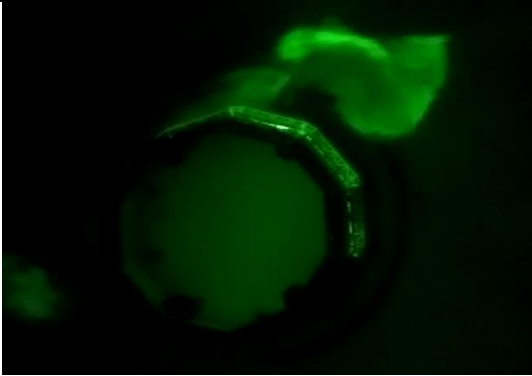
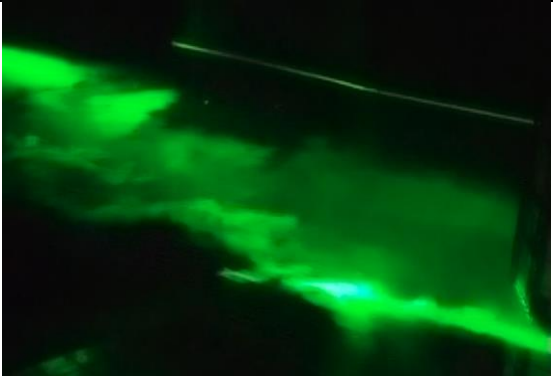
Для оценки характера течения ветрового потока вблизи модели и выбора теории обтекания тела выполнено экспериментальное исследование теньвым методом, результаты которого приведены на рисунках 3.23-3.26.

Данным методом определялся характер обтекания башенной металлической гиперболической градирни. На рисунке 3.23 приведено обтекание ветровым потоком градирни относительно плоскости XOZ с образованием малого вихря за моделью. На рисунке 3.24 также приведено обтекание относительно плоскости

ХОZ, но в данном случае анализируется сама работа данного сооружения, так как у горловины трубы образуется повышенное разрежение, происходит подсос дыма через нижние окна башни. На рисунке 3.25 приведена визуализация ветрового потока относительно плоскости ХОУ, где отчетливо видно образование большого вихря позади модели.

	
<p>Рисунок 3.23 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости ХОZ, подача дыма на вытяжную башню</p>	<p>Рисунок 3.24 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости ХОZ, подача дыма по низу башни</p>

На рисунке 3.26 приведена визуализация потока относительно ХОУ, 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 с частотой схода 2.18 Гц.

	
<p>Рисунок 3.25 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости ХОУ, подача дыма на вытяжную башню</p>	<p>Рисунок 3.26 – Визуализация обтекания ветрового потока изометрия, подача дыма на вытяжную башню</p>

Исходя из анализа характера обтекание 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.

3.4 Анализ влияния ветрового потока на башенную восьмигранную градирню пирамидальной формы

Проведены дренажные испытания для нахождения локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему и внутреннему контуру каждого яруса башенной градирни на рисунке 3.27 представлена уточненная модель башенной металлической каркасно-обшивной градирни пирамидальной формы с числом граней в плане восемь в масштабе 1:180 с соблюдением геометрического критерия подобия. Данная модель выполнена с открытыми подкрылками у основания вытяжной башни и отражает период эксплуатации данного сооружения в летний период времени.

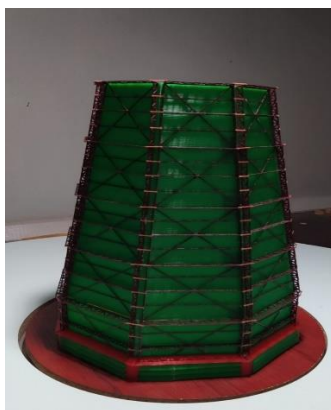


Рисунок 3.27 – Макет башенной металлической восьмигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м^2 , расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)

На рис. 3.28. представлены сводные график распределения C_{pi} по внешнему контуру восьмигранной каркасно-обшивной пирамидальной формы градирни направление ветра на грань. Приведенные сводные графики распределения аэродинамических коэффициентов по пяти ярусам наиболее характерно отражают картину обтекания ветровым потоком данного сооружения. Рисунок 3.28 с

максимальными значениями отражает пульсационную составляющую при сходе вихря. На графике максимальное значение активного давления составило +1,45 минимальное -4,36 представляет собой область, в которой образуется и в последующем сходит вихрь. Протяженность области отрицательного давления составляет 23 градуса от 56 до 79 градусов присутствуют характерные отклонения от нормального распределения при сравнении с распределением ветрового давления с цилиндром, которые не отражаются в нормах [6,7].

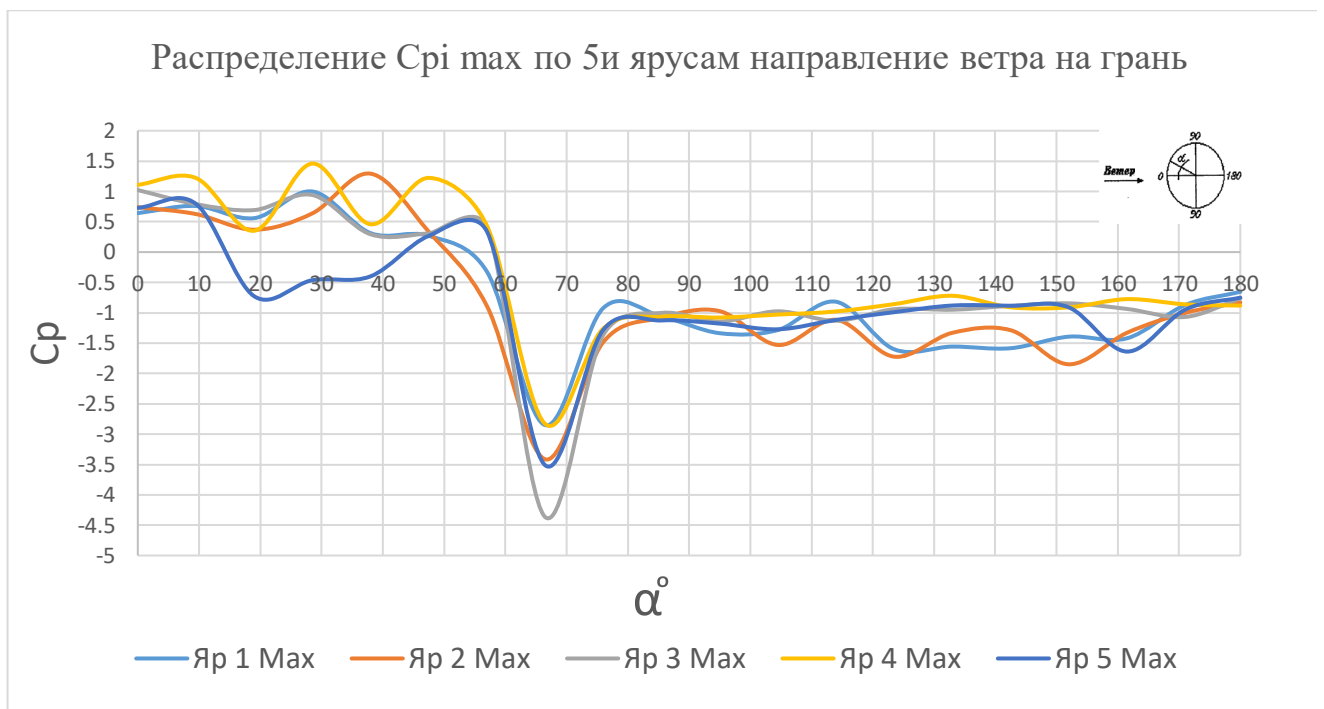


Рисунок 3.28 – Распределение $C_{p_i \max}$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (летний период эксплуатации)

Для данного вида сооружений регламентируется проведение продувок в аэродинамической трубе на грань и на ребро БМГ. На рисунке 3.29 приведены результаты проведенного экспериментального исследования при на бегании ветрового потока на ребро. Зона активного давления находится от 0 до 34 градусов с максимальным значением локального коэффициента +1,48. Область схода вихря с максимальным отрицательным давлением -1,76 находится от 32 до 47 градусов.

При проведении экспериментальных исследований также проводились измерения показателей локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру БМГ. Графики распределения локальных аэродинамических коэффициентов по внутреннему контуру представлены в приложении В.

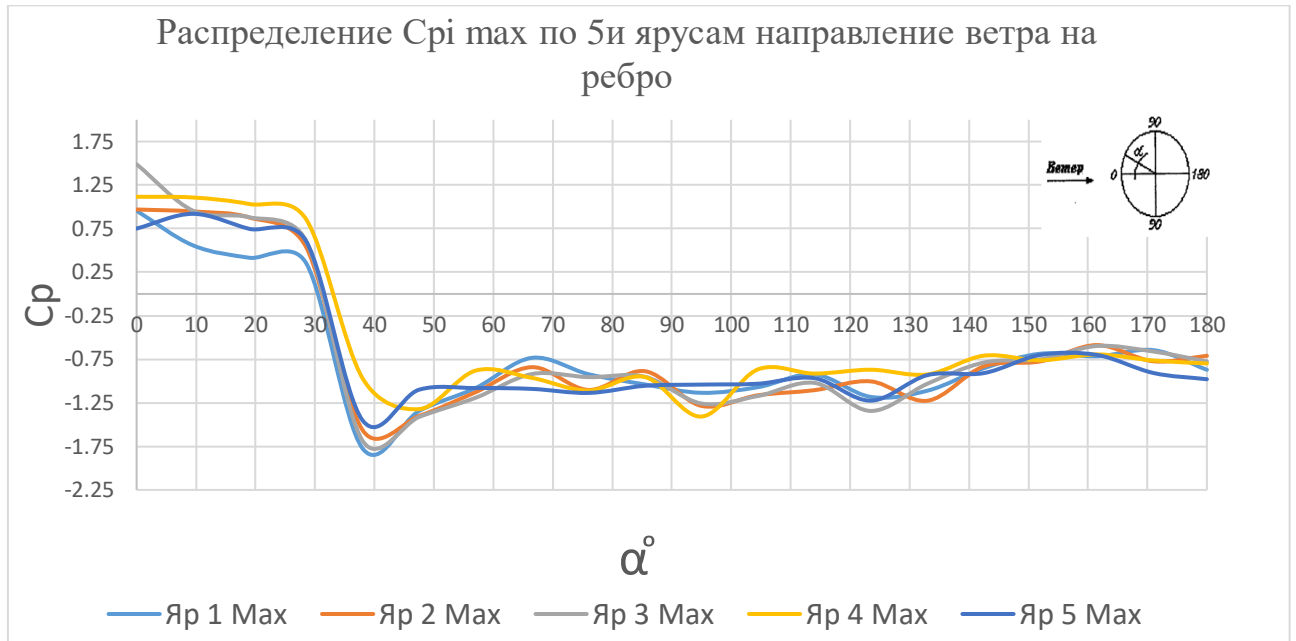


Рисунок 3.29 – Распределение $C_{pi} \max$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на ребро (летний период эксплуатации)

В нормативных документах регламентируется сезонность работы БМГ применением локального аэродинамического коэффициента внутреннего давления равным 0.8. Зимний период эксплуатации отличается от летнего тем что в зимний период времени окна через которые поступает воздух закрываются для уменьшения ветрового потока который приводит к активному обледенению конструкций оросителя. С учетом данной особенности также проводились аэродинамические продув в трубе разработанной модели (приложение В рисунок В.51). На рисунке В.52а представлено распределение локальных аэродинамических коэффициентов по внешнему контуру БМГ в зимний период времени с набегания ветрового потока на грань. Показатели C_{pi} в зимний период эксплуатации не превышают показатели летнего режима работы также неизменными остались области активного, отрицательного давления при сходе вихря. При продувке на ребро рисунок В.54а отсутствует зона схода вихря, но неизменным остается область активного давления, которая также не превышает показатели летнего периода.

Осреднённые показатели локальных аэродинамических коэффициентов внутреннего давления колеблется в пределах 0,8 (рисунок В.53б, В.55б), что также соответствует значению, приведённому в нормативных документах.

Максимальные значения по экспериментальным данным при продувке на грань колеблется от 0,96 до 1,7 (рисунок В.53а) при продувке на ребро от 1,06 до 1,85 в зимний период времени (рисунок В.55а)

Проведены экспериментальные исследования влияния ветрового потока на этапах возведения БМГ на модельный ряд, представленный ранее на рисунке 2.8 описание каждой из стадий представлено в таблице 2.3.

Выявлена монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса БМГ (рисунок 3.30) с нехарактерным распределением локальных аэродинамических коэффициентов, отличающаяся от распределения в стадии эксплуатации. Область активного давления от 0 до 32 градусов с максимальным локальным коэффициентом +1.21, также наблюдается смещение области с пиковыми отрицательными значениями. Область схода вихря находится от 32 до 78 градусов с максимальным значением локального коэффициента – 2,73, не превышает значение максимального коэффициента при стадиях эксплуатации, что не превышает значение максимального коэффициента при стадиях эксплуатации, но значительно увеличивается область образования и схода вихря. Распределение пикового давления по внутреннему контуру (рисунок В.58а) колеблется от 0.48 до 1.88. Осреднённые показатели давления внутреннего контура колеблется в пределах 0,5-1 (рисунок В.58б). Стадии монтажа при замыкании карт от первого до третьего ярусов имеют такой же характер распределения, как и у монтажной стадии четыре, но в значительной мере меньшими показателями локальных аэродинамических коэффициентов.

Для оценки характера течения ветрового потока вблизи модели и выбора теории обтекания тела выполнено экспериментальное исследование теньвым методом, результаты которого приведены на рисунках 3.31-3.34.

Данным методом определялся характер обтекания башенной металлической гиперболической градирни. На рисунке 3.31 приведено обтекание ветровым потоком градирни относительно плоскости XOZ с образованием малого вихря за моделью. На рисунке 3.32 также приведено обтекание относительно плоскости

ХОZ, но в данном случае анализируется сама работа данного сооружения, так как у горловины трубы образуется повышенное разрежение, происходит подсос дыма через нижние окна башни. На рисунке 3.33 приведена визуализация ветрового потока относительно плоскости ХОУ, где отчетливо видно образование большого вихря позади модели.

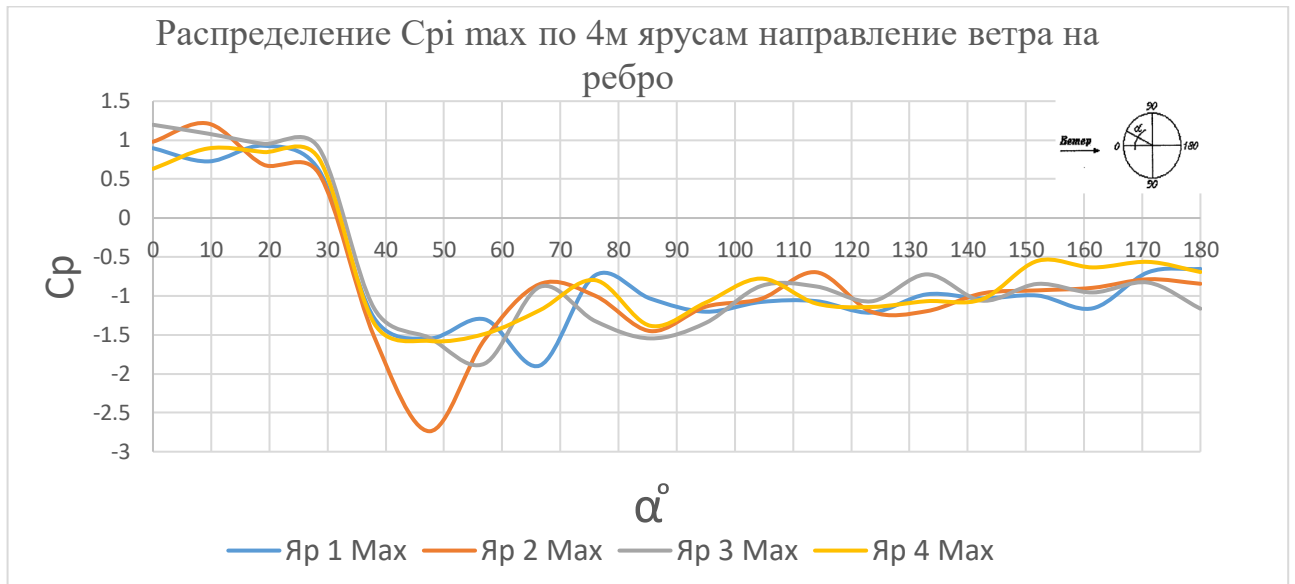


Рисунок 3.30 – Распределение $C_{p1} \max$ по внешнему контуру БМГ, направление ветра на грань (монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса)

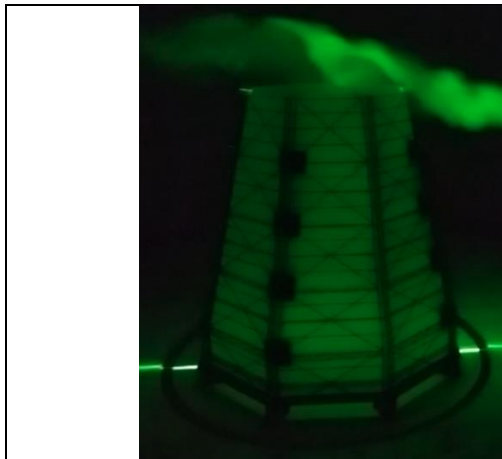


Рисунок 3.31 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости ХОZ, подача дыма на вытяжную башню

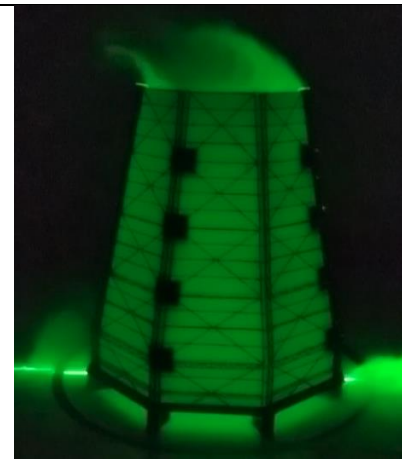
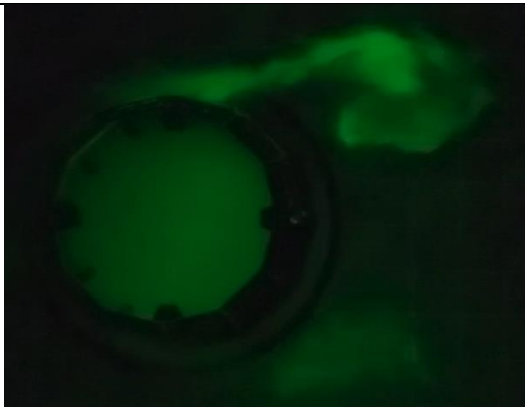
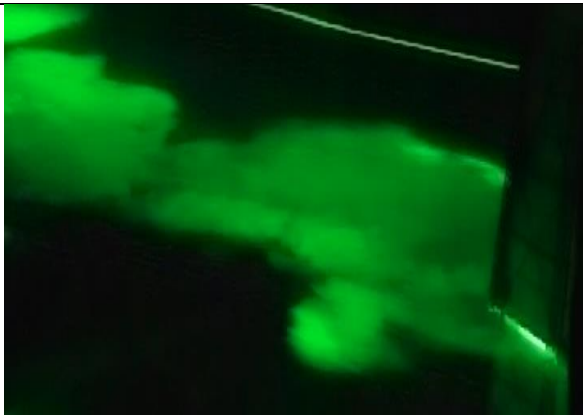


Рисунок 3.32 – Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости ХОZ, подача дыма по низу башни

	
<p>Рисунок 3.33 - Визуализация обтекания ветрового потока относительно плоскости XOY, подача дыма на вытяжную башню</p>	<p>Рисунок 3.34 - Визуализация обтекания ветрового потока изометрия, подача дыма на вытяжную башню</p>

На рисунке 3.34 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 с частотой схода 2.01 Гц. Исходя из анализа характера обтекание 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.

3.5 Выводы по разделу 3

1. Получены 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.

2. 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 местом с отрицательными давлениями возникающей при сходе вихря.

3. Выполнено определения характера обтекания БМГ различной конструктивной формы с определением частот схода вихря.

РАЗДЕЛ IV. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА БАШЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГРАДИРНИ

4.1 Численный анализ влияния ветрового воздействия на различные формы БМГ.

Численные исследования проводились в программном комплексе Autodesk CFD. Целью проведения численных исследований обтекания ветровым потоком БМГ является верификация полученных экспериментальных данных в аэродинамической трубе, а также выбора модели турбулентности, наиболее точно описывающей полученные явления при проведении экспериментальных исследований.

В ходе выполнения численного исследования применялись модели, выполненные в программном комплексе AutoCAD, по которым производилась 3D печать макетов для продувки в аэродинамической трубе с учетом металлического каркаса (рисунок 4.1). В последующем при построении сетки и расчете уточненной модели увеличилось количество расчетных элементов до 2.5 миллиона. Данное увеличение количества элементов негативно сказывалось на проведении расчета. Было принято решения производить расчет упрощенной модели, в которой в качестве упрощения отсутствовал металлический каркас (рисунок 4.2).

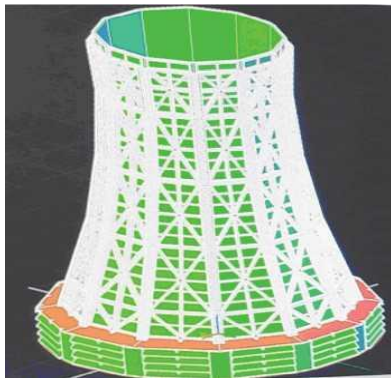


Рисунок 4.1 – Модель БМГ гиперболической формы с учетом металлического каркаса.

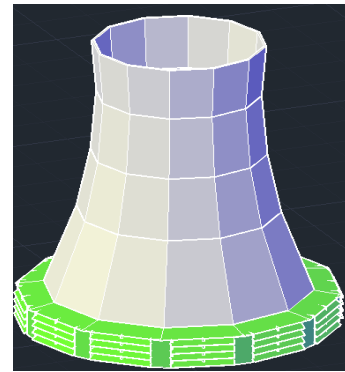


Рисунок 4.2 – Модель БМГ гиперболической формы без учета металлического каркаса.

Упрощенную модель также можно использовать для проведения экспериментальных исследований в аэродинамической трубе, но при этом БМГ модель становится телом вращения. Такие тела следует продувать на повышенных скоростях ветрового потока от 30м/с. При введении металлического каркаса в модель увеличивается шероховатость и повышается число Рейнольдса (Re). При меньших скоростях ветрового потока данное явление описано С.Г. Кузнецовым и Е.В. Гороховым [20]. При проведении численных исследований применение моделей с высокой детализацией увеличивает количество элементов сетки, следовательно, требует значительных ресурсов персонального компьютера.

Для корректно проведенного верификационного расчета требуется воссоздание условий и характеристик, применяемых при проведении экспериментальных исследований, таких как:

1. геометрическая сходимость макета модели с расчетной моделью;
2. материал, из которого изготовлена макет должен быть корректно описан в расчетной модели;
3. расчетная область должна сходиться с площадью сечения и протяженностью аэродинамической трубы;
4. температура воздуха;
5. численное описание профиля набегания ветрового потока с применяемым при проведении экспериментальных исследований;
6. модель турбулентного потока;
7. количество итераций;
8. шаг итераций по времени.

Численное описание профиля ветрового потока аэродинамической трубы МАТ-1 описано в работе Э.А. Лозинского [45] и представлено во второй главе на рисунке 2.6, 2.7. На рисунке 4.3 представлен профиль набегания ветрового потока, построенный в расчетном комплексе Autodesk CFD по графику, приведенному на ранее представленном рисунке 2.6. При выборе модели турбулентности стоит опираться на данные, полученные при проведении экспериментальных исследований при визуализации ветрового потока. Обращалось внимание на

характер и структуру потока, обтекающую испытываемую модель. Также обращалось внимание на образование вихрей, частоту и их амплитуду.

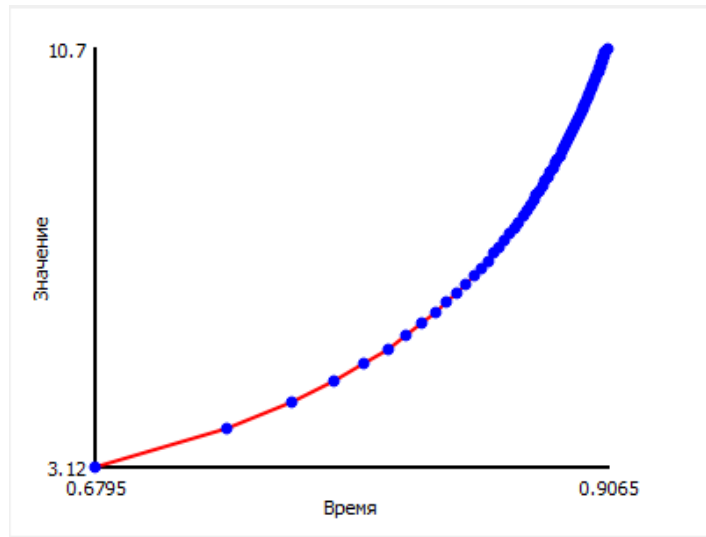


Рисунок 4.3 – Профиль набегания ветрового потока, построенный в программном комплексе Autodesk CFD.

Результаты исследований обтекания ветровым потоком каркасно-обшивных башенных градирен, полученные с использованием численного метода конечных объемов представлены, на рисунках 4.4, 4.5. Показано рассеивание турбулентной энергии в плоскости при обтекании двенадцатигранной гиперболической модели. Для оценки рассеивания турбулентной энергии, полученные результаты численных исследований сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными методом лазерного ножа (рисунки 4.5, 4.7).

Полученные численным методом распределения локальных аэродинамических коэффициентов, (рисунок 4.8), сопоставлены с экспериментальными данными (рисунок 4.9), полученными в лаборатории строительной аэродинамики «ДОННАСА». Принято решение проводить верификацию по датчикам, расположенным на стыке четвертого и пятого ярусов для моделей БМГ гиперболической и пирамидальной формы чтобы исключить эффекты срыва вихря от острых краев модели. 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.

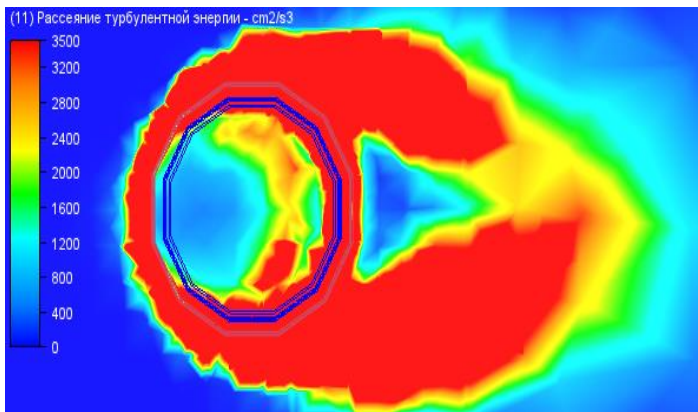


Рисунок 4.4 – Рассеивание турбулентной энергии для модели, двенадцатигранной гиперболической градирни, плоскость XOY

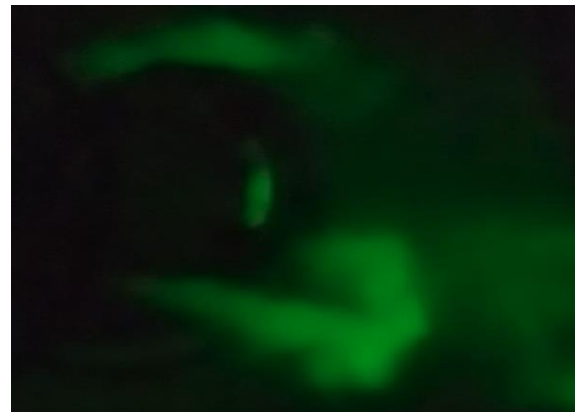


Рисунок 4.5 – Визуализация обтекания двенадцатигранной гиперболической градирни, плоскость XOY

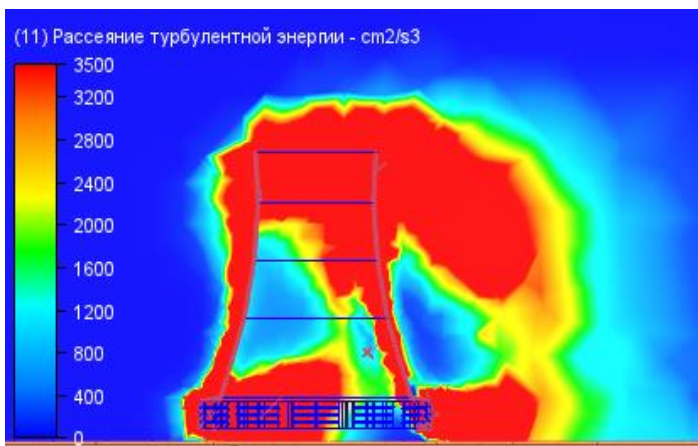


Рисунок 4.6 – Рассеивание турбулентной энергии для модели, двенадцатигранной гиперболической градирни, плоскость XOZ



Рисунок 4.7 – Визуализация обтекания двенадцатигранной гиперболической градирни, плоскость XOZ



Рисунок 4.8 – График распределения коэффициентов давления C_p яруса четыре, двенадцатигранной гиперболической градирни.



Рисунок 4.9 – Экспериментальные данные распределения C_p расположенных на стыке четвертого и пятого ярусов двенадцатигранной БМГ гиперболической формы.

Полученные численные и экспериментальные данные значительно отличаются как интенсивностью давления на поверхность модели с предложенными графиками распределения в нормативных документах [3,5,6,8], регламентирующих ветровое воздействие на башенные каркасно-обшивные градирни при отсутствии проведенных модельных экспериментальных данных.

На рисунке 4.10 приведено распределение аэродинамических коэффициентов для башенных каркасно-обшивных градирен гиперболической формы. При отсутствии модельных экспериментальных данных, полученных в аэродинамической трубе. На рисунке 4.10 приведено три графика для различных параметров отношения H - высоты сооружения к d - диаметру. Для моделей площадью орошения 1600 м^2 данное соотношение составляет $H/d=1.19$. Значения данного показателя находились путем интерполяции значений между приведенными в нормативном документе [5].

Для башенных каркасно-обшивных градирен пирамидальной формы нормативный документ [5] при отсутствии данных лабораторных испытаний

предлагает нам применять график, представленный на рисунке 4.11. Данный график применяется для круглых цилиндрических резервуаров.



Рисунок 4.10 – Распределение C_{pi} для БМГ гиперболической формы при отсутствии данных лабораторных испытаний.

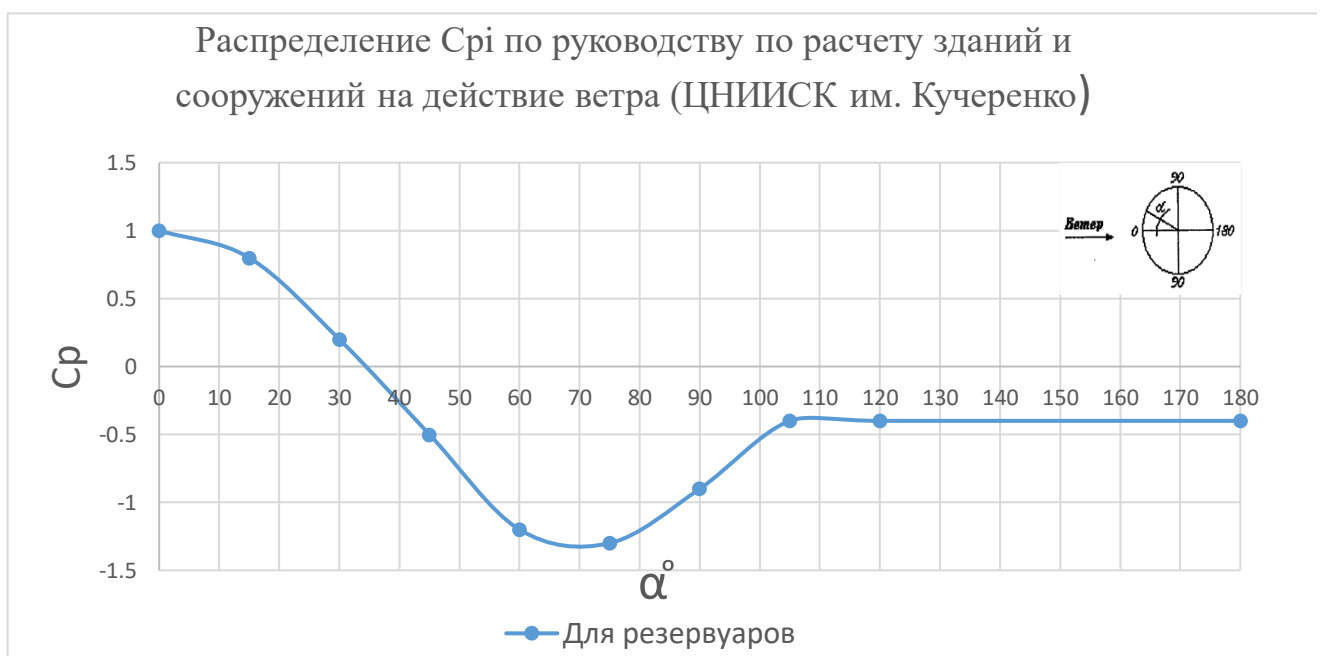


Рисунок 4.11 – Распределение C_{pi} для БМГ пирамидальной формы при отсутствии данных лабораторных испытаний.

На рисунке 4.12 – приведены изополя распределения локальных коэффициентов C_p в плоскости сопряжения карт четвертого и пятого ярусов,

которые в последующем сопоставлялись с полученными экспериментальными данными рисунка 4.13.

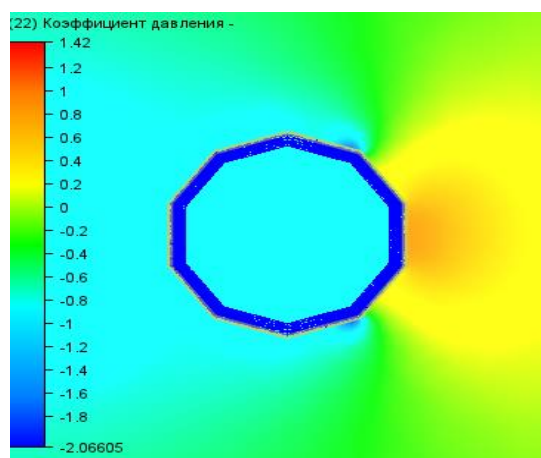


Рисунок 4.12 – Изополя распределения коэффициентов давления C_{p1} четвертого яруса десятигранной пирамидальной градирни.

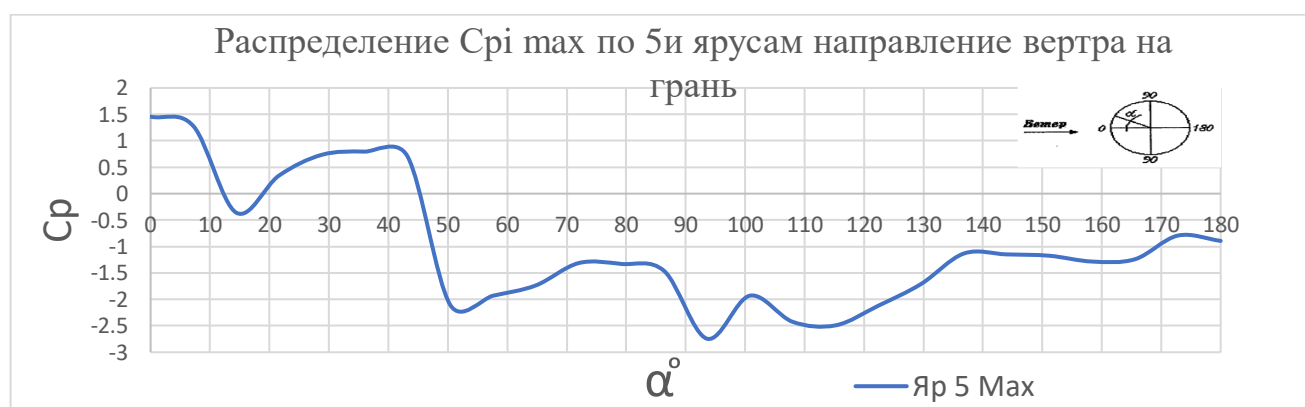


Рисунок 4.13 – Экспериментальные данные распределения C_p , расположенных на стыке четвертого и пятого ярусов десятигранной БМГ пирамидальной формы

Для оценки проведенной верификационной задачи принято решение сопоставлять только показатели тех датчиков и координат численной модели, в которых расположены пиковые значениями активного давления, а также области схода вихря с максимальным отрицательным давлением. Исходя из проведенных экспериментов в данных точках наблюдается наиболее стабильное давление с минимальным вкладом от пульсационной составляющей. Также хотелось бы отметить, что при увеличении итераций до значения более десяти тысяч и подборе шага по времени возможно достижение адекватных значений C_{p1} в областях с нестабильностью результатов от вклада пульсационной составляющей. В таблицах 4.1, 4.2 представлен сравнительный анализ полученных численных и

экспериментальных данных двенадцатигранной БМГ гиперболической формы (таблица 4.1) и десятигранной БМГ пирамидальной формы (таблица 4.2)

Таблица 4.1 Верификация численных и экспериментальных данных двенадцатигранной БМГ гиперболической формы.

№ п/п	α°	Численная модель	Экспериментальные данные	% сходимости
1.	0	1.98	1.92	96.87
2.	35	0.527	0.597	88.27
3.	40	-0.83	-0.97	85.64
4.	70	-2.05	-1.77	83.05
5.	135	-0.96	-1.08	88.89

Таблица 4.2 Верификация численных и экспериментальных данных десятигранной БМГ пирамидальной формы.

№ п/п	α°	Численная модель	Экспериментальные данные	% сходимости
1.	0	1.42	1.45	97.93
2.	46	0.08	0	92
3.	50.4	-1.8	-2.11	85.31
4.	140	-1	-1.14	87.71

Верификационный расчет показал приемлемую сходимость в пределах от 85 до 95% при применении теории Reynolds Averaged Navier-Stokes SST k- ω DES расчета и минимальном количестве итераций в десять тысяч.

4.2 Исследование распределения температурных полей и технологической наледи в процессе эксплуатации БМГ.

В данном разделе проводится исследование температурных полей, возникающих при эксплуатации башенной металлической градирни гиперболической формы в зимний период времени. Необходимость проведения данного исследования возникла в процессе анализа нормативных документов [3,6–8] которые регламентируют нагрузки и воздействия на БМГ но не отражают нагрузки, связанные с технологическим процессом, проходящим в данном сооружении.

Для адекватной оценки вклада от ветровой нагрузки в НДС башенных металлических градирен, руководствуясь нормативными документами [6,7]

принято решение нахождения величин и характера технологических нагрузок путем сбора статистических данных, которые в последующем применялись для разработки специализированного стенда для определения технологической наледи в морозильной камере лаборатории «ДОННАСА».

Согласно разделу 14 [3] и разделу 12 [8] в данном случае рекомендуется установить нагрузки в иных нормах на проектирование строительных конструкций, или данные нагрузки устанавливаются заданием на проектирование либо согласно рекомендациям, разработанным в рамках научно-технического сопровождения.

Согласно разделам вышеперечисленных нормативных документов, мы имеем возможность, в данном случае, воспользоваться пособием по проектированию градирен [6], в котором раздел 6 пункт 6.4 регламентирует специфические условия работы башенной металлической градирни. Также пункты с 6.13 по 6.17 регламентируют все нагрузки и воздействия на сооружение, но что касается нагрузки от технологической наледи и воздействия от температуры, то нет никаких конкретных рекомендаций по распределению и величине этих нагрузок.

Целью проведенного исследования температурных полей, возникающих при эксплуатации башенной металлической гиперболической градирни в зимний период времени является оценка и уточнение действительных температурных полей, возникающих при различных погодных условиях.

Измерение температурных полей проводилось при помощи тепловизора TESTO 868, специально разработанного для проведения профессиональной термографии с погрешностью в результатах измерения 2% от измеряемого значения.

Проведены контрольные измерения температурных полей двенадцатигранной гиперболической вытяжной башни высотой +54.9 м при температуре окружающей среды $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерения проводились по каждой из граней градирни. На рисунке 4.15 представлена термограмма наиболее теплой стороны градирни, находящейся с подветренной стороны северо-восточного направления. На розе ветров г. Макеевки преобладает восточный ветер, данное явление возможно объяснить

территорией заводской застройки. Но согласно [6] данные сооружения должны проектироваться с учетом розы ветров так, чтобы возможные потери при охлаждении оборотной воды не образовывали наледи на рядом стоящих зданиях и сооружениях. Проанализировав территорию застройки предприятия в данном случае, отмечается, что испарения от градирни согласно полученным данным направлены в сторону лесополосы без какой-либо застройки. По метеорологическим данным и характеру налипания снега на вытяжную башню можно сделать вывод о том, что наиболее теплой стороной является подветренная сторона.

На термограмме (рисунок 4.15) отчетливо видно распределение температурных полей в конструктивных элементах БМГ, при этом разность температуры конструктивных элементов от окружающей среды варьируется от -1.1 C° до -6 C° при температуре окружающей среды -6 C° .

В ходе проведения контрольных измерений также проводились замеры температурного поля бассейна градирни, результаты которых представлены на рисунке 4.16. Температура подаваемой воды в бассейн для охлаждения составила $+10.7\text{ C}^\circ$. Во время проведения эксперимента градирня работала в холостом режиме с подачей охлаждаемой воды $12\ 000\text{ м}^3/\text{час}$ и проведенными специальными мероприятиями по предотвращению технологической наледи, указанными в [6]. Температура воздуха у горловины градирни составила $+6\text{ C}^\circ$. Также проводились замеры технологической наледи на строительных конструкциях на отметке $+54\text{ м}$, при этом толщина наледи составляла от 15 до 21 мм .

Проведены повторные измерения при температуре окружающей среды -12 C° (рисунок 4.17;4.18) при холостом режиме работы градирни. Данные, полученные в ходе проведенного натурного исследования температурных полей, применены для верификации специально разработанного стенда, представленного на рисунке 4.18. Данный стенд позволяет определить характер распределения технологической наледи на металлоконструкциях БМГ. На рисунке 4.19 представлен полученный результат распределения технологической наледи на металлоконструкциях БМГ с учетом набегания ветрового потока на грань сооружения.

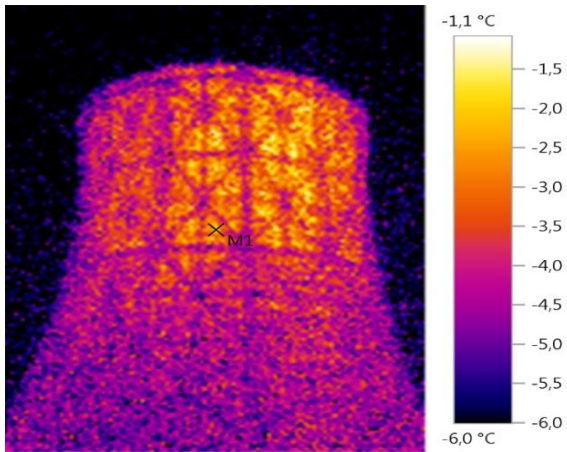


Рисунок 4.15 – Температурное поле градирни при $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

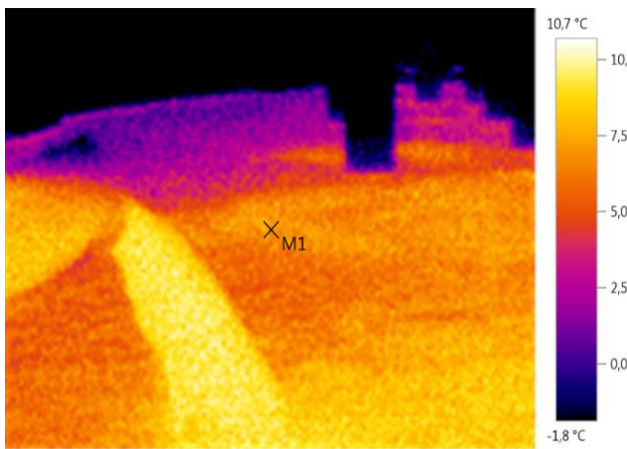


Рисунок 4.16. – Температурное поле бассейна башенной металлической градирни при $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$

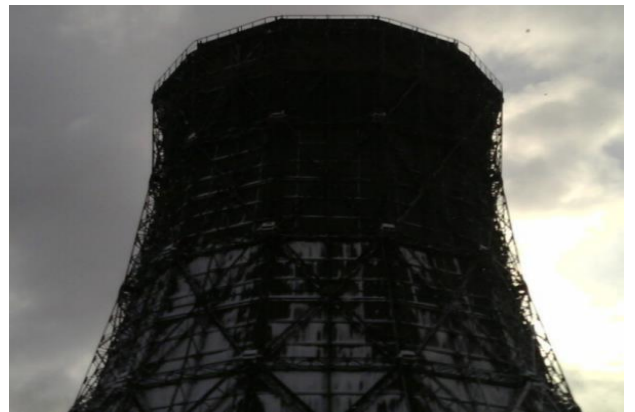
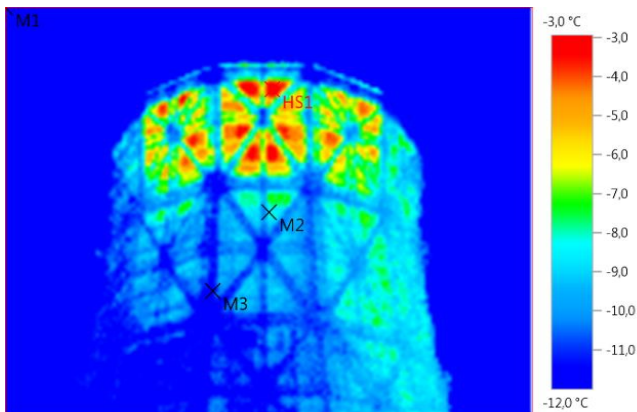


Рисунок 4.17 Температурное поле наиболее теплого участка выпяжной башни градирни при $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 4.18 – Стенд для определения распределения технологической наледи, размещённый в морозильной камере ДОННАСА



Рисунок 4.19 – Распределение технологической наледи при воздействии ветрового потока на грань БМГ при температуре -6 С°

4.3 Численный анализ влияния полученных эпюр ветрового давления на НДС БМГ.

Для анализа влияния полученной нагрузки с учетом изменения протяженности области и места с отрицательными давлениями, возникающими при сходе вихря построены численные модели для оценки влияния на НДС БМГ методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА САПР 2022 (рисунки 4.1-4.4) с учетом конструктивной формы и этапов возведения.

Численные модели выполнены при помощи таких конечных элементов (КЭ) как: - Тип 10 – универсальный пространственный стержневой КЭ (моделирование метало-каркас БМГ);

- Тип 42 – универсальный треугольный КЭ оболочки (моделирование обшивки);

- Тип 44 – универсальный четырехугольный КЭ оболочки (моделирование обшивки);

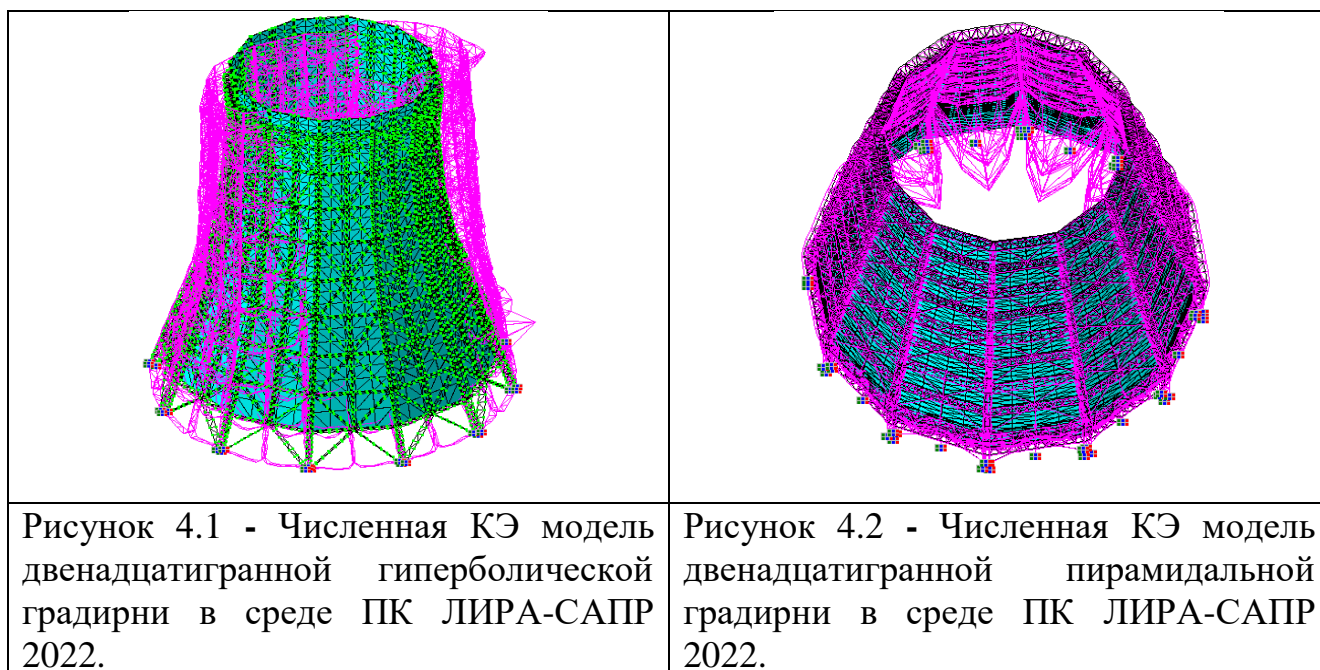
Составлены основные расчетные сочетания нагрузок (РСН), приведенные в таблице 3. Расчетные сочетания 1-3 применялись для оценки НДС БМГ в стадии эксплуатации, а РСН №4 для оценки влияния на НДС на стадии монтажа.

Таблица 4.3 Расчетное сочетание нагрузок на БМГ.

Нагрузки		РСН1	РСН2	РСН3	РСН4
Постоянные	Собственный вес сооружения,	+	+	+	+
	от веса водяной пленки	+	+	+	-
Длительные	от пыли	+	+	+	-
	температурное воздействие	+	+		-
	от снега	-	+	-	-
Кратковременные	от мет. наледей	-	+	-	-
	от тех. наледей	-	+	+	-
	Ветровое воздействие наружный контур	+	+	+	+
	Ветровое воздействие внутренний контур	+	+	+	+

Проведенный прочностной численный анализ показал, что следует учитывать воздействия 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.

Основной задачей численного анализа было нахождение форм и частот колебаний (рисунок 4.1-4.4) БМГ и проведения сравнительного анализа (таблица 4.4) с частотами схода вихря, полученными экспериментальным путем в аэродинамической трубе МАТ-1, во избежание явлений резонанса.



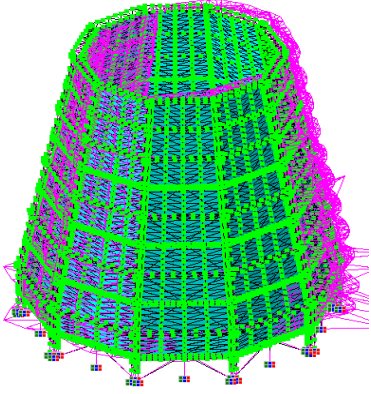
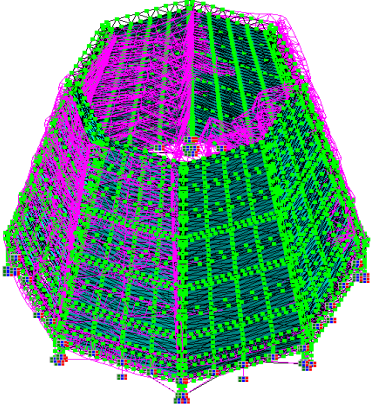
	
<p>Рисунок 4.3 - Численная конечно-элементная модель десятигранной пирамидальной градирни в среде ПК ЛИРА-САПР 2022.</p>	<p>Рисунок 4.4 - Численная конечно-элементная модель восьмигранной пирамидальной градирни в среде ПК ЛИРА-САПР 2022.</p>

Таблица 4.4 Сравнительный анализ частот колебаний БГМ с частотами схода вихря

Наименование	Расчетные частоты колебаний БГМ (Гц)	Экспериментальные частоты схода вихря (Гц)
12 гранная БГМ гиперболической формы	2.12	2.66
12 гранная БГМ пирамидальной формы	1.83	2.82
10 гранная БГМ пирамидальной формы	1.66	2.18
8 гранная БГМ пирамидальной формы	2.32	2.01

4.4 Выводы по разделу 4

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

2. Собранные статистические данные температурных полей составили основу для выполнения стенда позволяющего определить площадь и характер распределения технологической наледи.

3. Полученные статистические данные, а также данные, полученные на стенде в морозильной камере, позволили наиболее точно определить вклад в НДС от влияния ветровой нагрузки.

4. Конечно-элементным методом определено что:

- при проектировании башенных металлических градирен следует учитывать воздействия 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 градирни с гиперболической формой. Показатель аэродинамического коэффициента на данной монтажной стадии выше на 30% по отношению к стадии эксплуатации.

5. Выполнен статистический сбор и обработка результатов наблюдений за распределением температурных полей и распределение технологической наледи в зимний период времени. Определен экспериментальным путем характер распределение технологической наледи на горловине БМГ.

РАЗДЕЛ V. УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА БАШЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГРАДИРНИ

5.1 Рекомендации по расчету БМГ площадью орошения 1600м² конечно элементным методом

Данные рекомендации распространяются на проектирование отдельно стоящих башенных металлических градирен площадью орошения до 1600м². Приведенные графики распределения ветрового воздействия представленные с учетом влияния пульсационной составляющей ветрового потока.

Полученные эпюры ветрового воздействия, приведенные в пункте 5.2, описывают ветровое воздействие на БМГ гиперболической формы с учетом воздействия ветра на грань (рисунок 5.1а) и на ребро (рисунок 5.1б). Учет ветрового воздействия на грань и ребро являются обязательным требованием при проектировании сооружений данного типа. Также в пункте 5.2 приведен график распределения ветрового воздействия на стадии замыкания карт четвертого яруса (рисунок 5.1в) БМГ. Данный график следует применять для учета воздействия на обшивку БМГ и подбора шага при расстановке балок крепления обшивки.

Графики, представленные в пункте 5.3 полученные для БМГ пирамидальной формы с различным количеством граней. Без учета стадии монтажа так как при монтаже значение локальных аэродинамических коэффициентов (C_{pi}) не превышают стадии эксплуатации.

Данные нагрузки рекомендовано прикладывать на обшивку данных сооружений. Для автоматизации данного процесса в пункте 5.2, 5.3 приведено численное описание графиков распределения C_{pi} .

Приложение ветрового воздействия в программном комплексе ЛИРА САПР с наименьшей потерей данных рекомендовано путем составления текстового файла (работа с текстовыми файлами ЛИРА САПР приведена на сайте компании). Предварительно за моделировав обшивку перейдите в меню программы «Таблицы ввода» упорядочите узлы и элементы от низа к верху сооружения по часовой стрелке. После этого выгрузите текстовый файл и для каждого узла оболочки с учетом его расположения используя требования нормативного документа [3] и

дойдя до этапа с C_{pi} воспользуйтесь график либо таблицей приведенной в пункте 5.2, 5.3 .

5.2 Уточненная методика нормирования ветровой нагрузки БМГ гиперболической формы площадью орошения 1600м^2 .

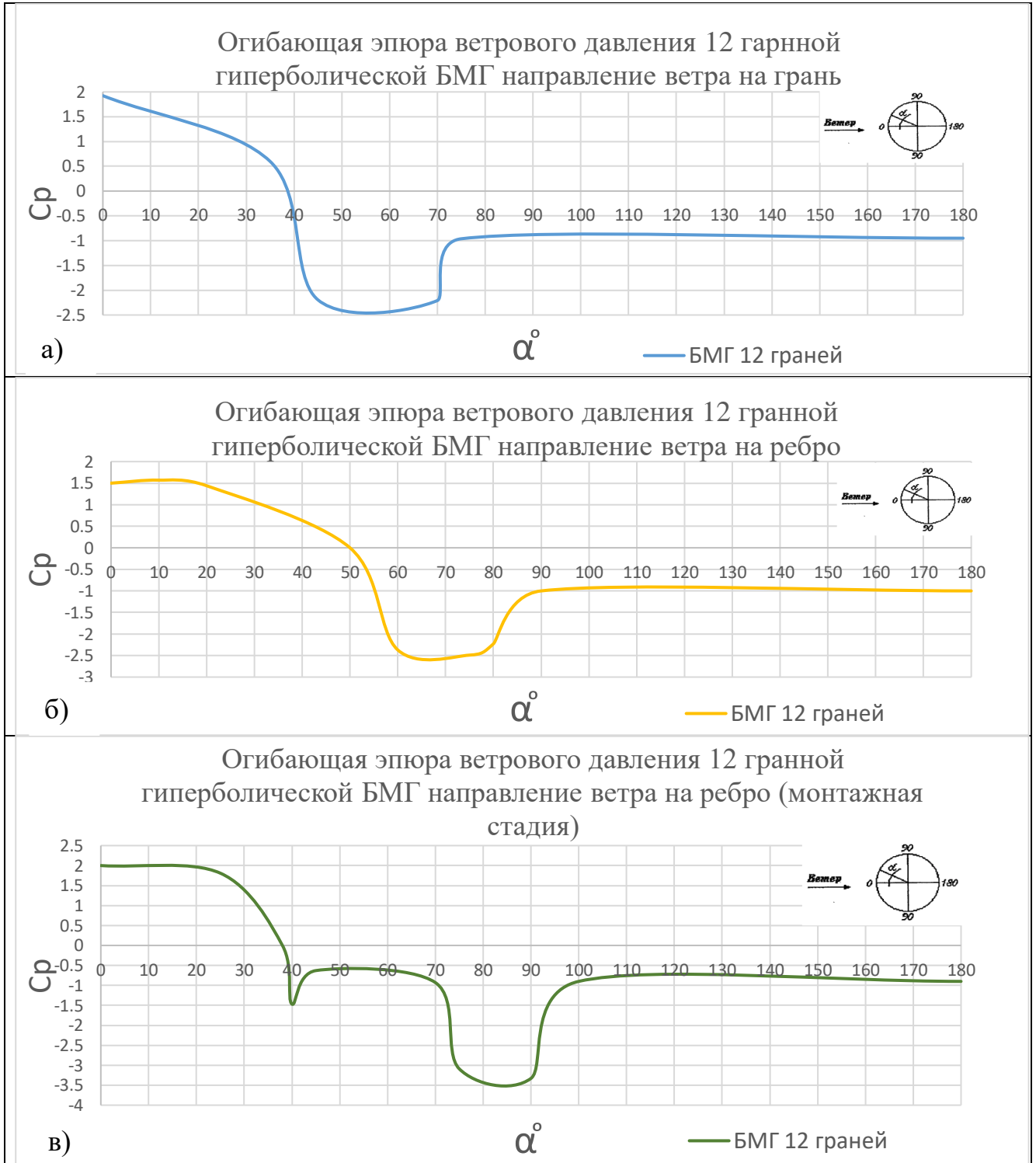


Рисунок 5.1 - Огибающая эпюра ветрового давления 12 гранной гиперболической БМГ: а) направление ветра на грань (стадия эксплуатации); б) направление ветра на ребро (стадия эксплуатации); в) направление ветра на ребро (монтажная стадия).

Таблица 5.1 Численное описание полученных распределений C_{pi} для гиперболической двенадцатигранной БМГ.

Огибающая эпюра ветрового давления 12 гарнной гиперболической БМГ направление ветра на грань (стадия эксплуатации)	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 35$	$C_{pi} = \frac{131.034x - 4948}{x^2 + 21.18x - 2572}$
$35 < x \leq 45$	$C_{pi} = \frac{-15.966x + 615.642}{x^2 - 84.821x + 1839}$
$45 < x \leq 70$	$C_{pi} = -7.196 \times 10^{-5}x^3 + 0.0138x^2 - 0.871x + 15.556$
$70 < x \leq 180$	$C_{pi} = \frac{0.84x - 58.267}{4.562 \times 10^{-4}x^2 - x + 67.529}$
Огибающая эпюра ветрового давления 12 гранной гиперболической БМГ направление ветра на ребро (стадия эксплуатации)	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 50$	$C_{pi} = -0.009x^2 + 0.0152x + 1.52025$
$50 < x \leq 90$	$C_{pi} = 0.0055x^2 - 0.7904x + 25.55$
$90 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1$
Огибающая эпюра ветрового давления 12 гранной гиперболической БМГ направление ветра на ребро (монтажная стадия)	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 38$	$C_{pi} = -0.0035x^2 + 0.079x + 2$
$38 < x \leq 45$	$C_{pi} = 0.129x^2 - 10.7997x + 224.01$
$45 < x \leq 70$	$C_{pi} = -0.012x - 0.09$
$70 < x \leq 100$	$C_{pi} = 0.0131x^2 - 2.2212x + 89.982$
$100 < x \leq 180$	$C_{pi} = -0.9$

5.3 Уточненная методика нормирования ветровой нагрузки БМГ пирамидальной формы площадью орошения 1600м².

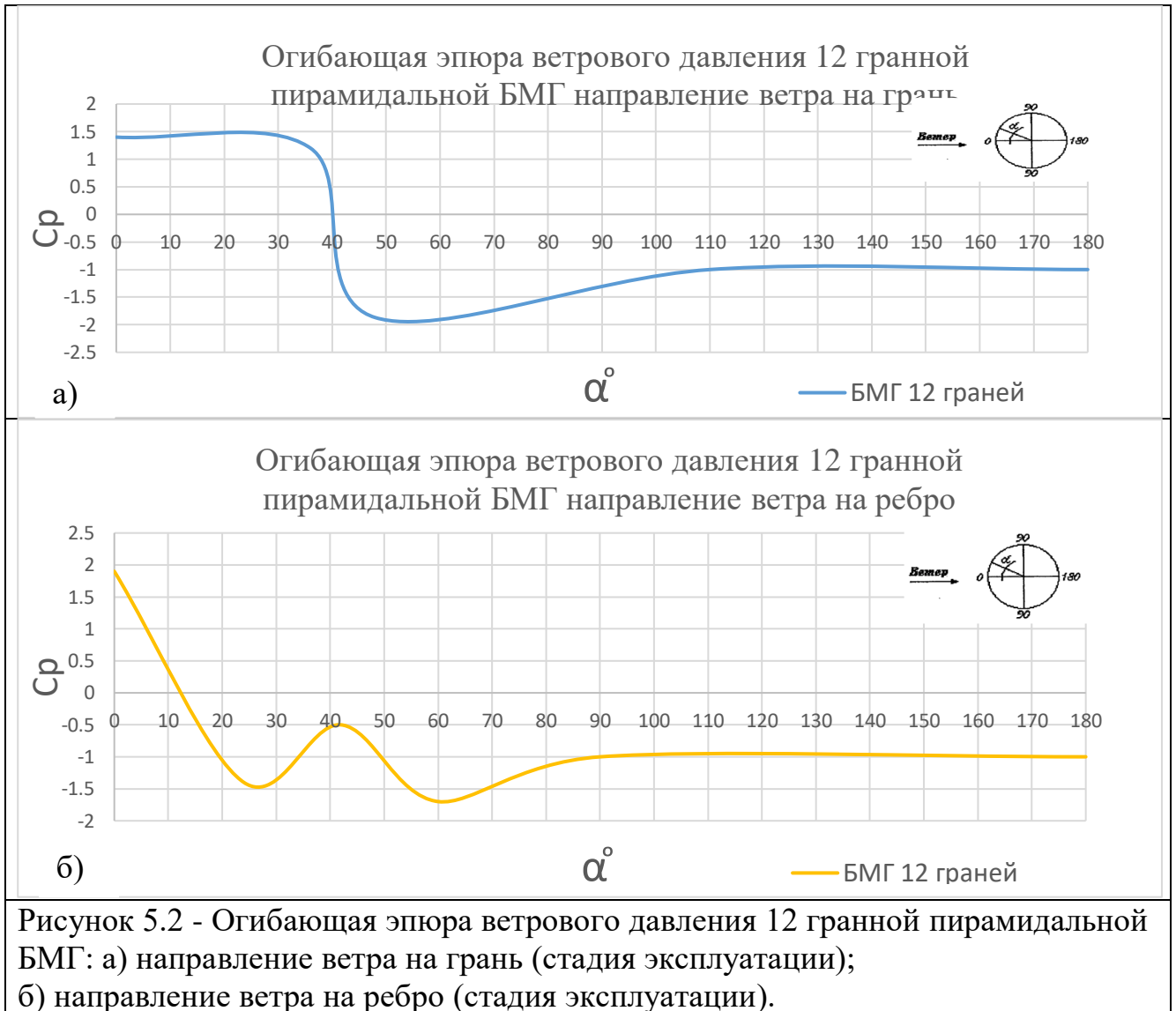


Таблица 5.2 Численное описание полученных распределений C_{pi} для пирамидальной двенадцатигранной БМГ.

Огибающая эпюра ветрового давления 12 гранной пирамидальной БМГ направление ветра на грань (стадия эксплуатации)	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 36$	$C_{pi} = -0.0056x + 1.4$
$36 < x \leq 48$	$C_{pi} = -0.2558x + 10.41$
$48 < x \leq 110$	$C_{pi} = 0.014x - 2.5435$
$110 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1$

Огибающая эпюра ветрового давления 12-гранной пирамидальной БМГ направление ветра на ребро (стадия эксплуатации)	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 42$	$C_{pi} = 0.0045x^2 - 0.2446x + 1.9$
$42 < x \leq 90$	$C_{pi} = 0.0019x^2 - 0.2579x + 7.025$
$90 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1$

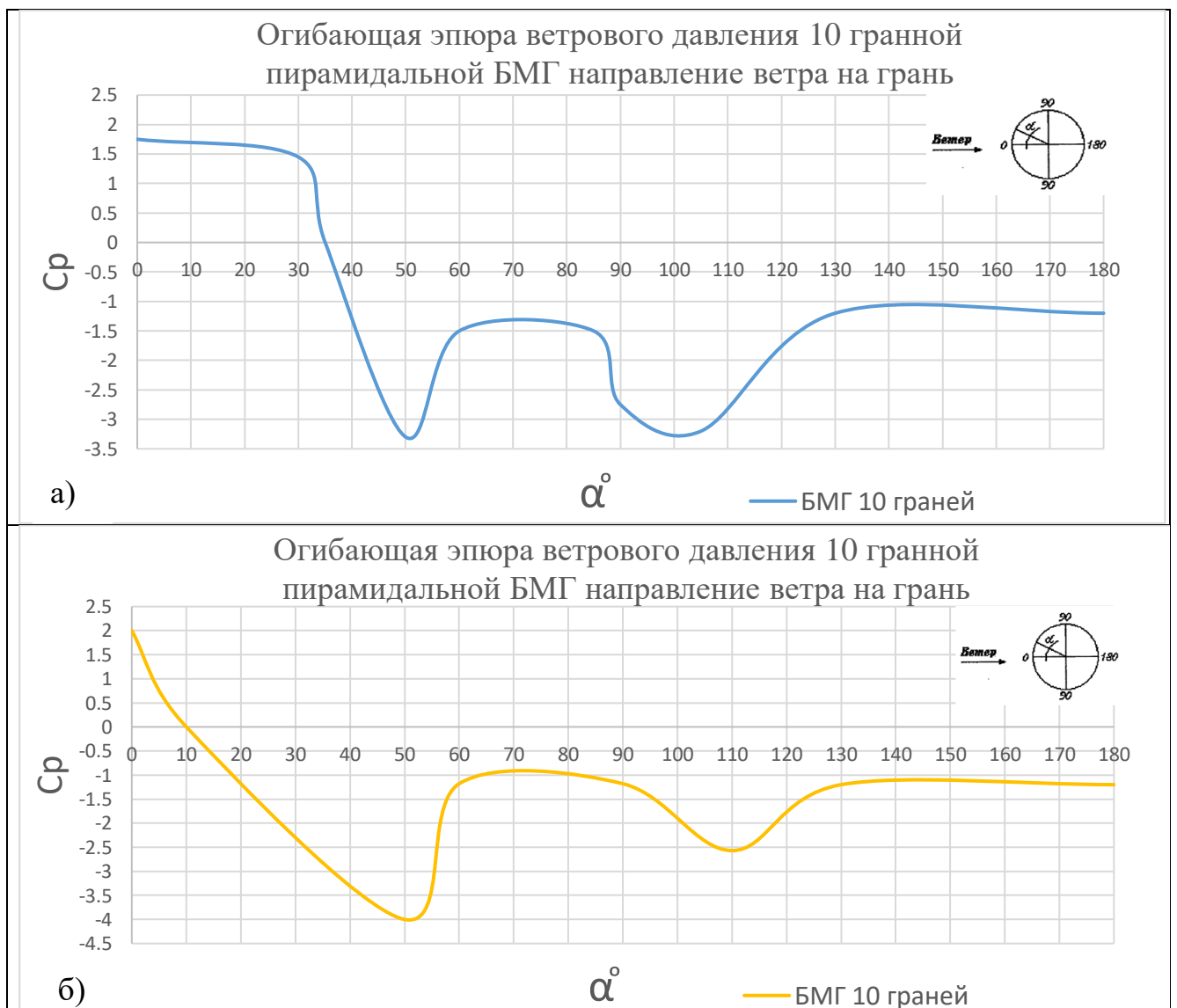
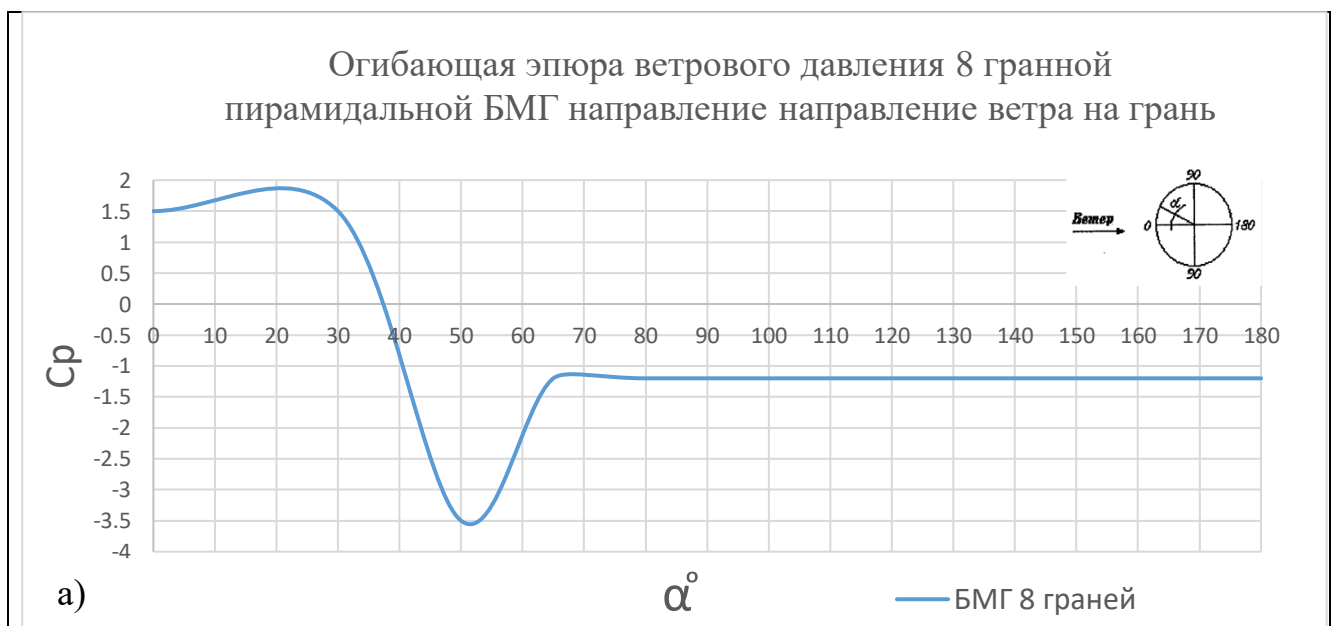


Рисунок 5.3 - Огибающая эпюра ветрового давления 10-гранной пирамидальной БМГ: а) направление ветра на грань (стадия эксплуатации); б) направление ветра на ребро (стадия эксплуатации).

Таблица 5.3 Численное описание полученных распределений C_{pi} для пирамидальной десятигранной БМГ.

Огибающая эпюра ветрового давления 10 гранной пирамидальной БМГ направление ветра на грань	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 50$	$C_{pi} = -0.0041x^2 + 0.1029x + 1.7668$
$50 < x \leq 130$	$C_{pi} = 0.00007x^3 - 0.0194x^2 + 1.652x - 46.435$
$130 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1.2$
Огибающая эпюра ветрового давления 10 гранной пирамидальной БМГ направление ветра на грань	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 60$	$C_{pi} = 0.0048x^2 - 0.3557x + 2.4308$
$60 < x \leq 90$	$C_{pi} = -1.2$
$90 < x \leq 130$	$C_{pi} = 0.0034x^2 - 0.7535x + 38.872$
$130 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1.2$



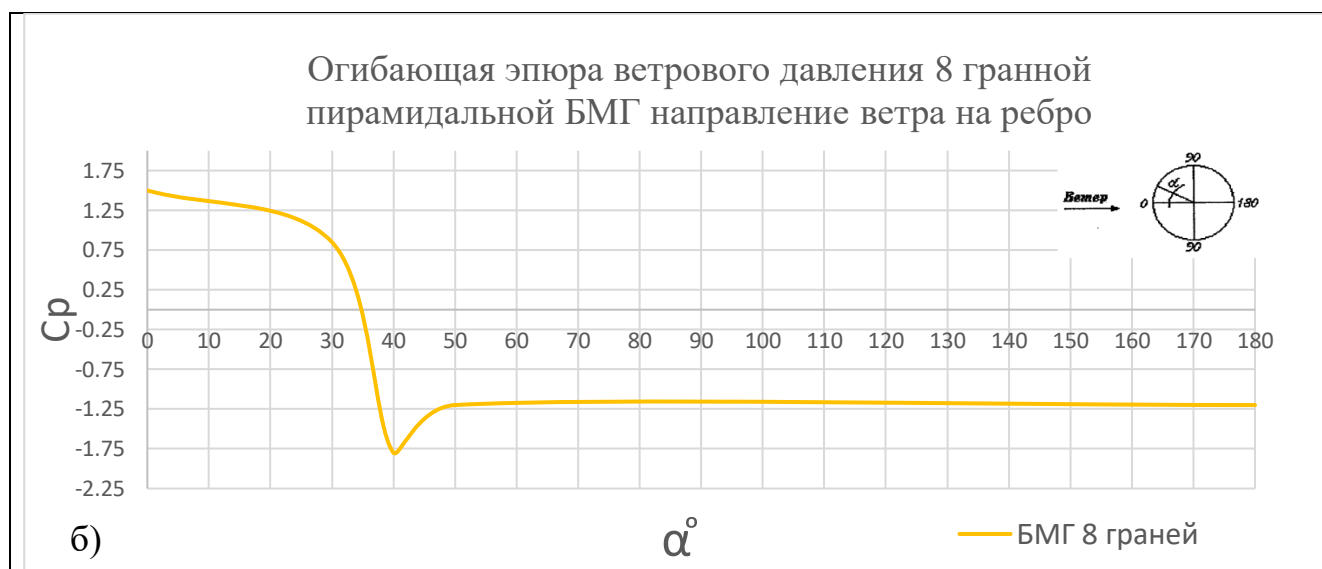


Рисунок 5.4 - Огибающая эпюра ветрового давления 8 гранной пирамидальной БМГ: а) направление ветра на грань (стадия эксплуатации); б) направление ветра на ребро (стадия эксплуатации).

Таблица 5.4 Численное описание полученных распределений C_{pi} для пирамидальной восьмигранной БМГ.

Огибающая эпюра ветрового давления 8 гранной пирамидальной БМГ направление направление ветра на грань	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 30$	$C_{pi} = 1.5$
$30 < x \leq 65$	$C_{pi} = 0.0009x^3 - 0.1133x^2 + 4.5965x - 57.657$
$65 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1.2$
Огибающая эпюра ветрового давления 8 гранной пирамидальной БМГ направление ветра на ребро	
Угол, град.	Формула
$0 \leq x \leq 30$	$C_{pi} = -0.0217x + 1.5$
$30 < x \leq 50$	$C_{pi} = 0.0163x^2 - 1.4025x + 28.3$
$50 < x \leq 180$	$C_{pi} = -1.2$

5.4 Выводы по главе 5

1. 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.

2. Разработан методический подход для нормирования ветрового воздействия, путем верификации и сравнения данных по нагрузке на баненные каркасно-обшивные металлические градирни гиперболической и пирамидальной формы, вычисленных по методике, предложенной автором.

3. С использованием верифицированного методического подхода для нормирования ветровых нагрузок на БМГ предложены расчетные формулы, 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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 численного моделирования обоснованы программы и методики экспериментальных и численных исследований по уточнению величин аэродинамических коэффициентов для конструктивных форм и этапов возведения башенных металлических каркасно-обшивных градирен площадью орошения до 1600м².

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 C_x , C_y , 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 C_p от числа Рейнольдса Re в пределах от 2.71×10^5 до 3.29×10^5 .

- Значения и характер распределения локальных аэродинамических коэффициентов C_p для конструктивных форм башенных каркасно-обшивных металлических градирен, не регламентированных в нормативных документах с учетом монтажных стадий.
- Значения и характер распределения локальных аэродинамических коэффициентов C_p 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 C_p 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 комплексе Autodesk CFD, что позволило:

- верифицировать экспериментальные данные, полученные в метеорологической аэродинамической трубе МАТ-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 $k-\omega$ 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 и эксплуатации уникальных зданий и сооружений» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и проектирование зданий и сооружений (МК)»); Б1.В.03 «Технология и организация реконструкции и ремонтно-восстановительных работ» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и практика организационно-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 организационно-технологических и экономических решений»), что отображено в учебных планах и рабочих программах дисциплин (модулей).
- возможностью нормирования ветровой нагрузки для БМГ с учетом этапов возведения;
- возможностью нормирования ветровой нагрузки для БМГ с учетом сезонной работы сооружения.

5. Результаты исследования 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 при подготовке специалистов по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство», программа подготовки «Теория и проектирование зданий и сооружений (МК)» в дисциплине «Особенности расчета, проектирования и эксплуатации уникальных зданий и сооружений», по программе подготовки «Теория и практика организационно-технологических и экономических решений» в дисциплинах «Технология и организация реконструкции и ремонтно-восстановительных работ», «Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 376 р.
2. Берман. Градирни. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1941. 209 р.
3. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. N 891 / пр-ст: дата введения 04-06-2017 / исполнители ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство" при участии ФГБУ "Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова". – Москва: Стандартформ, 2017. – 105 с. – Текст: непосредственный.
4. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения особые воздействия: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 августа 2017 г. N 1105/пр-ст: дата введения 04-02-2018 / исполнители АО "НИЦ "Строительство" - ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко при участии АО МНИИТЭП, ФГБУ "ГГО им. А. И. Воейкова".– Москва: Стандартформ, 2018. – 30 с. – Текст: непосредственный.
5. Руководство по расчёту зданий и сооружений на действие ветра. М.: Стройиздат, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. 1978. 216 р.
6. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84). Москва: Центральный институт типового проектирования, 1989. 194 р.
7. Руководство по проектированию градирен. Москва: Союзводоканалпроект, 1980. 144 р.
8. Государственные строительные нормы Украины ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Минстроя Украины от 3 июля 2006 г. № 220 / пр-ст: дата введения 01-01-2007 / исполнители Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций им. В. Н. Шимановского» (ОАО Укрнипроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского). -Киев: Минстрой Украины, 2006. – 78с. – Текст: непосредственный.

9. Национальный стандарт Украины ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. Общие действия. Ветровые воздействия: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Министерства регионального развития и строительства от 27.12. 2010 № 552 / пр-ст: дата введения 01-07-2014 / / исполнители ОАО «Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций им. В. Н. Шимановского». – Киев: Министерство регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Украины, 2011. – 174 с. – Текст: непосредственный.
10. Зубенко А.В. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.23.01 “Особенности формирования ветровой нагрузки на элементы вертикального цилиндрического резервуара с учетом особенностей конструктивной формы и блочного расположения”: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Макеевка: ГОУ ВПО “Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,” 2020. 172 p.
11. Риттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. Москва: Стройиздат, 1984. 294 p.
12. Риттер Э.И. Аэродинамика зданий. Москва: Стройиздат, 1968. 240 p.
13. Риттер Э.И. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: ОНТИ, 1936. 216 p.
14. Савицким Г.Л. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: Стройиздат, 1972. 112 p.
15. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. Москва: Стройиздат, 1984. 360 p.
16. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. 713 p.
17. Пичугин С.Ф., Махинько А.В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. Полтава: АСМІ, 2005. 342 p.
18. Мхитарян А.М. Аэродинамика. Москва: Машиностроение, 1976. 448 p.
19. Горохов Е.В. et al. Аэродинамика электросетевых конструкций. Донецк: Компьютер Норд, 2000. 336 p.
20. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здание и сооружения. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 168 p.
21. Кузнецов С.Г. Эффекты волнообразования при обтекании ветровым потоком высотных зданий и сооружений. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 200 p.

22. Горлин С.М. Экспериментальная аэродинамика. — М.: Высшая школа. 1970. 423 р.
23. Гордеев В.Н. et al. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. — М.: АСВ. 2007. 676 р.
24. Голубаев А.Г. et al. Аэродинамика. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 687 р.
25. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Издательство АСВ. Москва, 2017. 720 р.
26. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Часть 1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. Москва: Высшая школа, 1976. 384 р.
27. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г., Васылев В.Н. Ветровая среда вокруг высотного здания // Строительство Материаловедение Машиностроение Сборник Научных Трудов Приднепровской Государственной Академии Строительства И Архитектуры Днепрпетровск. 2007. № 43. Р. 139–147.
28. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г., Васылев В.Н. Воздействие ветра на высотные здания и их комплексы // Сборник Научных Трудов Московского Государственного Строительного Университета. 2008. Р. 86–90.
29. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Ветровые нагрузки на низких зданиях в застройке с высотным зданием // Журнал Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка Сучасне Промислове Та Цивільне Будівництво. 2006. Vol. 22, № 1. Р. 51–56.
30. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Математическое моделирование ветрового взаимодействия башенных сооружений квадратного сечения // Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка. 2007. Vol. 6, № 68. Р. 13–17.
31. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Учет ветровых воздействий на высотное здание в условиях городской застройки // Материалы Международной Научно-Практической Конференции Ростовский Государственный Строительный Университет Ростов-На- Дону Строительство. 2008. Р. 204–206.
32. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Тимофеев Н.В. Экспериментальное исследование значений аэродинамических коэффициентов на моделях оболочек покрытий // Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка. 2001. Vol. 2, № 5. Р. 31.

33. Горохов Е.В. et al. Поле скоростей ветра в приземной области двух высотных зданий // Київський Національний Авіаційний Університет. 2003. Vol. 4, № 42. P. 9–12.
34. Горохов Е.В. et al. Ветровая нагрузка на высотное здание // МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ. 2011. Vol. 17, № 4. P. 225–235.
35. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г., Васылев В.Н. Расчет ветровых нагрузок на конструкции в условиях городской застройки // 36 Наук Праць Українського Наук-Доел Та Проектного Інституту Сталевих Конструкцій Ім ВМ Шимановського Київ. 2008. № 1. P. 16–23.
36. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Механизм интерференционного эффекта при определении ветровой нагрузки // Журнал Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка Сучасне Промислове Та Цивільне Будівництво. 2006. Vol. 2, № 4. P. 177–185.
37. Горохов Е.В. et al. Натурное исследование ветровых нагрузок на высотных сооружениях // Современные Строительные Конетрукнии Из Металла И Древесины Сборник Научных Трудов Одесской Государственной Академии Строительства И Архитектуры. Vol. 20, № 17. P. 33–38.
38. Горохов Е.В. et al. Экспериментальные исследования влияния формы покрытия стадиона на аэродинамические загрузки // Сб Статей МОО Москва Пространственные Конструкции Зданий И Сооружений Исследования Расчет Проектирование И Применение. 2008. № 11. P. 82–93.
39. Горохов Е.В. et al. Экспериментальные исследования влияния формы покрытия стадиона на аэродинамические загрузки // Журнал Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка Металеві Конструкції. 2008. Vol. 14, № 1.
40. Кузнецов С.Г. Ветровой режим в приземной области высотного здания // Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка. 1998. Vol. 2, № 10. P. 100–103.
41. Павловский Р.Н., Кузнецов С.Г. Моделирование приземного пограничного слоя атмосферы в аэродинамических трубах с короткой рабочей частью // Журнал Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка Сучасне Промислове Та Цивільне Будівництво. 2009. Vol. 5, № 1.

42. Кузнецов С.Г. Ветровой режим вокруг высотного здания, расположенного в застройке // Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка. 1998. Vol. 4, № 12. P. 130–139.
43. Кузнецов С.Г. К определению аэродинамических коэффициентов на поверхностях стен башенного здания // Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва І Архітектури Макіївка. 1995. Vol. 1, № 1. P. 92–95.
44. Кузнецов С.Г. Взаимодействие двух высотных зданий в ветровом потоке // Научно-Технический Сборник Донецкий ПромстройНИИпроект Современные Проблемы Строительства. 2007. Vol. 5, № 10. P. 54–59.
45. Лозинский Э.А. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.23.01 “Рациональные параметры призматических высотных зданий, минимизирующих воздействие ветрового подпора на окружающую застройку”: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2013. 213 p.
46. Мущанов В.Ф., Зубенко А.В., Дроздов А.А. Исследование аэродинамических коэффициентов Провисающих мембранных покрытий инженерных сооружений // МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ. 2017. Vol. 23, № 2. P. 81–96.
47. Белостоцкий А.М., Акимов П.А. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО.-М.: АСВ. 2016. Vol. 1. 426 p.
48. Белостоцкий А.М., Акимов П.А. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. - М.: АСВ, 2016. Vol. 2. 594 p.
49. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. Численное моделирование строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействии и исследование реальных объектов // Вестник МГСУ. 2010. Vol. 4, № 5. P. 182–185.
50. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. Численное моделирование строительной аэродинамики. Разработка методик и исследования реальных объектов // Intematwatal J. Comput. Civ. Struct. Eng. 2010. Vol. 6, № 7. P. 67–69.

51. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Некоторые аспекты верификации программных средств численного моделирования конструкций и сооружений // *International J. Comput. Civ. Struct. Eng.* 2008. Vol. 4, № 2. P. 30.
52. Белостоцкий А.М. et al. Расчетное обоснование несущей способности Башни “Эволюция”, на значимых этапах жизненного цикла // *Высотные Здания.* 2015. № 3. P. 98–103.
53. Дубинский С.И., Болотов П.Е. Верификация методики компьютерного моделирования для расчета распределения давлений воздуха на наружной поверхности наружных ограждающих конструкции // *Вестник МГСУ.* 2011. № 7. P. 276–282.
54. Дубинский С.И., Дорошенко А.В. Численное моделирование скоростей ветра з реальной застройке на примере района г. Токио // *Приволжский Научный Журнал.* 2012. № 4. P. 70–75.
55. Дубинский С.И. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Москва: ФГБОУВПО “Московский государственный строительный университет,” 2010. 198 p.
56. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на комплекс «Федерация” / «Москва-Сити» // *Int. J. Comput. Civ. Struct. Engineering.* 2008. Vol. 4, № 2. P. 58–59.
57. Афанасьева И.Н. Изучение трехмерной структуры воздушного турбулентного потока при обтекании призмы прямоугольной формы // *Int. J. Comput. Civ. Struct. Eng.* 2011. Vol. 7, № 3. P. 43–49.
58. Афанасьева И.Н. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Москва: ФГБОУВПО “Московский государственный строительный университет,” 2014. 200 p.

59. Гагарин В.Г. et al. Вопросы применения современных компьютерных технологий для решения практических задач строительной аэродинамики // Вестник Отделения Строительных Наук Российской Академии Архитектуры И Строительных Наук. 2014. № 18. Р. 151.
60. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леденев П.В. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия // Жилищное Строительство. 2010. № 1. Р. 7–10.
61. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В. О достоверности компьютерных прогнозов при определении ветровых воздействий на здания и комплексы // Жилищное Строительство. 2014. № 7. Р. 130–138.
62. Гувернюк С.В., Леденев П.В. О влиянии эффектов трехмерного обтекания на распределение ветровых нагрузок на фасады высотного здания // Вестник Отделения Строительных Наук Российской Академии Архитектуры И Строительных Наук. 2014. № 18. Р. 151.
63. Казакевич М.И. Хаос в аэроупругих системах // Металлические Конструкции. 2008. Vol. 14, № 4. Р. 217–225.
64. Борштейн М.Ф. Ветровая нагрузка на высокие здания // Строительная Механика И Расчет Сооружений. 1974. № 6. Р. 2–9.
65. Атаманчук А.В. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.23.01 “Ветровые нагрузки на элементы трехгранных башен и пакеты вытяжных труб”: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2005. 187 р.
66. Козлов М.И. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.23.01 “Совершенствование методики расчета рекламных сооружений на ветровую нагрузку”: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. 159 р.
67. Alimchandani C.R., Patwardhan S.N. Design and construction of two 173 m tall Natural Draught Cooling Towers at Hissar in India // 3rd Int. Fib Congr. Exhib. Inc. PCI Annu. Conv. Bridge Conf. Think Glob. Build Local. Proc. Precast Prestressed Concrete Institute, 2010.
68. Armitt J. WIND LOADING ON COOLING TOWERS // ASCE J Struct Div. 1980. Vol. 106, № 3. Р. 623–641.

69. Babu G.R. et al. Experimental determination of wind-induced response on a model of natural draught cooling tower // *Exp. Tech.* 2013. Vol. 37, № 1. P. 35–46.
70. Bamu P.C., Zingoni A. Damage, deterioration and the long-term structural performance of cooling-tower shells: A survey of developments over the past 50 years // *Eng. Struct.* Elsevier BV, 2005. Vol. 27, № 12 SPEC. ISS. P. 1794–1800.
71. Bao K.Y., Shen G.H., Sun B.N. Numerical simulation of mean wind load on large hyperbolic cooling tower // *Kongqi Donglixue XuebaoActa Aerodyn. Sin.* 2009. Vol. 27, № 6.
72. Blue S.C. COOLING TOWER HARDWARE CORROSION STUDIES. // *Annu. Meet. - Cool. Tower Inst. Cooling Tower Inst*, 1983.
73. Chen G. et al. Critical guidelines to cope with the adverse impacts of the inner peripheral vortex in the high-level water collecting natural draft wet cooling tower // *Appl. Therm. Eng.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 168.
74. Chen N. et al. Parametric study on wind-induced effect of a cooling tower with hyperbolic steel trusses // *Jianzhu Jiegou XuebaoJournal Build. Struct. Science Press*, 2018. Vol. 39, № 4. P. 18–27.
75. Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J. Multiple loading effects on wind-induced static performance of super-large cooling towers // *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 2013. Vol. 13, № 8.
76. Cheng X., Zhao L., Ge Y. Wind tunnel investigation on interference effect of eight grouped super large cooling towers with rectangular arrangement // *Zhongnan Daxue Xuebao Ziran Kexue BanJournal Cent. South Univ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 44, № 1. P. 372–380.
77. Cheng X.X. et al. External extreme wind pressure distribution for the structural design of cooling towers // *Eng. Struct.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 181. P. 336–353.
78. Cheng X. et al. Wind pressures on a large cooling tower // *Adv. Struct. Eng. Multi-Science Publishing Co. Ltd*, 2015. Vol. 18, № 2. P. 201–219.
79. Cheremisinoff N.P., Cheremisinoff P.N. *Cooling towers: selection, design and practice.* Ann Arbor Sci. Publishers Inc, 1981.
80. Diaconita A.I., Andrei G., Rusu E. Estimation of the Tower Shape Effect on the Stress–Strain Behavior of Wind Turbines Operating under Offshore Boundary Conditions // *Inventions.* MDPI, 2022. Vol. 7, № 1.

81. Dong G.C. et al. Numerical simulation of the internal surface wind load of super large cooling tower under operating conditions // Hunan Daxue Xuebao Journal Hunan Univ. Nat. Sci. Hunan University, 2015. Vol. 42, № 1. P. 17–23.
82. Du L., Ke S. Effect of internal pressures for super large cylinder-conic section steel cooling towers // Zhongnan Daxue Xuebao Ziran Kexue Ban Journal Cent. South Univ. Sci. Technol. Central South University of Technology, 2018. Vol. 49, № 3. P. 684–695.
83. Du L., Ke S., Hou X. Comparative Research on Wind Vibration Coefficient for Cooling Towers Under the Internal and External Wind Pressure // Zhendong Ceshi Yu Zhenduan Journal Vib. Meas. Diagn. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. Vol. 39, № 3. P. 463–470.
84. Goudarzi M.A., Sabbagh-Yazdi S.R. Modeling wind ribs effects for numerical simulation external pressure load on a cooling tower of KAZERUN power plant-IRAN // Wind Struct. Int. J. Techno Press, 2008. Vol. 11, № 6. P. 479–496.
85. Izadi M., Bargi K. Natural draft steel hyperbolic cooling towers: Optimization and performance evaluation // Struct. Des. Tall Spec. Build. John Wiley and Sons Ltd, 2014. Vol. 23, № 9. P. 713–720.
86. Jia M.M. et al. Analysis of wind pressure time-history response and wind resisting performance for super large cooling tower // Gongcheng Lixue Engineering Mech. Tsinghua University, 2019. Vol. 36. P. 118–124.
87. Ke S.T. et al. A new methodology for analysis of equivalent static wind loads on super-large cooling towers // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier B.V., 2012. Vol. 111. P. 30–39.
88. Ke S.T. et al. A study on the action mechanism of internal pressures in straight-cone steel cooling tower under two-way coupling between wind and rain // Wind Struct. Int. J. Techno Press, 2018. Vol. 27, № 1. P. 11–27.
89. Ke S.T. et al. A study on the average wind load characteristics and wind-induced responses of a super-large straight-cone steel cooling tower // Wind Struct. Int. J. Techno Press, 2017. Vol. 25, № 5. P. 433–457.
90. Ke S. et al. Analysis of average wind pressure and responses under static wind for a cylinder-conic section steel cooling tower // Zhendong Yu Chongji Journal Vib. Shock. Chinese Vibration Engineering Society, 2017. Vol. 36, № 7. P. 149–155.

91. Ke S. et al. Comparison of comprehensive stress performances of super-large cooling tower in different four-tower arrangements under 3D asymmetric wind loads // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier B.V.*, 2018. Vol. 179. P. 158–172.
92. Ke S., Du L., Ge Y. Wind-induced internal pressure effect within a novel super-large cylindrical–conical steel cooling tower // *Struct. Des. Tall Spec. Build. John Wiley and Sons Ltd*, 2018. Vol. 27, № 15.
93. Ke S., Ge Y. Extreme Wind Pressures and Non-Gaussian Characteristics for Super-Large Hyperbolic Cooling Towers Considering Aeroelastic Effect // *J. Eng. Mech. American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2015. Vol. 141, № 7. P. 04015010.
94. Ke S.T., Du L.Y. Impact study on wind-induced response and stability for super large cooling tower with different aerodynamic measures // *Hunan Daxue XuebaoJournal Hunan Univ. Nat. Sci. Hunan University*, 2016. Vol. 43, № 5. P. 79–89.
95. Ke S.T., Zhu P. Wind loads of frequency domain characteristics for large cooling towers with aerodynamic measures based on large eddy simulation // *Zhejiang Daxue Xuebao Gongxue BanJournal Zhejiang Univ. Eng. Sci. Zhejiang University*, 2016. Vol. 50, № 11. P. 2143–2149.
96. Ke S., Wang H., Ge Y. Comparison of stationary and non-stationary wind-induced responses of a super-large cooling tower based on field measurements // *Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd*, 2019. Vol. 137. P. 331–346.
97. Ke S., Wang H., Ge Y. Non-Gaussian characteristics and extreme distribution of fluctuating wind pressures on large cylindrical–conical steel cooling towers // *Struct. Des. Tall Spec. Build. John Wiley and Sons Ltd*, 2017. Vol. 26, № 18.
98. Ke S., Wang H. Non-Gaussian wind pressure of cylindrical-cone steel cooling tower based on large eddy simulation // *Jianzhu Jiegou XuebaoJournal Build. Struct. Science Press*, 2018. Vol. 39, № 2. P. 114–121.
99. Ke S., Xu L., Zhu P. Analysis on Time Domain Characteristics of Wind Loads during Construction Period of Super Large Cooling Towers Based on Large Eddy Simulation // *Hunan Daxue XuebaoJournal Hunan Univ. Nat. Sci. Hunan University*, 2018. Vol. 45, № 11. P. 62–72.
100. Ke S., Yu W. Aerodynamic Forces and Mechanical Properties Studies for Super Large Cooling Towers Under Simultaneous Action of Wind and Rain // *Zhendong Ceshi Yu ZhenduanJournal Vib. Meas. Diagn. Nanjing University of Aeronautics an Astronautics*, 2018. Vol. 38, № 4. P. 800–809.

101. Ke S., Zhu R., Wang H. Wind-Induced Stability of Cylindrical-Cone Steel Structure Cooling Tower Considering Geometry and Material Nonlinearity // Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao Journal Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. Vol. 51, № 5. P. 719–727.
102. Ke S. et al. LES Numerical Analysis on Aerodynamic Performance for Novel Steel Cooling Tower with Straight Cylinder-Cone Section // Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao Journal Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. Vol. 50, № 4. P. 442–451.
103. Ke S. et al. Parameter analysis of wind loads and wind induced responses for super-large cooling towers: Self-excited force effect // Tumu Gongcheng Xuebao China Civ. Eng. J. 2012. Vol. 45, № 12. P. 45–53.
104. Ke S. et al. Prediction on wind effects of large cooling towers based on grey-neural network joint model // Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao Journal Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. Vol. 46, № 4. P. 652–658.
105. Ke S.T. et al. Stability and Reinforcement Analysis of Superlarge Exhaust Cooling Towers Based on a Wind Tunnel Test // J. Struct. Eng. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2015. Vol. 141, № 12. P. 04015066.
106. Ke S.T. et al. Wind-induced responses of super-large cooling towers // J. Cent. South Univ. 2013. Vol. 20, № 11. P. 3216–3228.
107. Koepper H.D. EXTREME LOADING EFFECTS ON COOLING TOWERS. Springer-Verlag, 1984. P. 362–373.
108. Kollár L. Large reticulated steel cooling towers // Eng. Struct. 1985. Vol. 7, № 4. P. 263–267.
109. Kumar C.L.M. et al. Effect of Buckling Due to Wind Load on Analysis of Natural Draught Cooling Tower // Lect. Notes Civ. Eng. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022. Vol. 162. P. 1077–1093.
110. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 1974. Vol. 3, № 2. P. 269–289.
111. Li X. et al. A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers // Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 150. P. 250–270.
112. Li G., Cao W.B. Structural analysis and optimization of large cooling tower subjected to wind loads based on the iterative of pressure // Struct. Eng. Mech. Techno-Press, 2013. Vol. 46, № 5. P. 735–753.

113. Li P.F. et al. Wind tunnel investigation on wind load characteristics for super large cooling towers // *Gongcheng Lixue Engineering Mech.* 2008. Vol. 25, № 6. P. 60–67.
114. Li W. et al. Wind-induced collapse mechanism and failure criteria of super-large cooling tower based on layered shell element model // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier B.V.*, 2022. Vol. 221.
115. Liu H., Zhang W., Yuan H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections // *Eng. Struct. Elsevier Ltd*, 2016. Vol. 124. P. 473–479.
116. Liu R.F., Shen G.H., Sun B.N. Numerical simulation study of wind load on large hyperbolic cooling tower // *Gongcheng Lixue Engineering Mech.* 2006. Vol. 23, № SUPPL. P. 177–183.
117. Liu Z., Zhang C., Ishihara T. Numerical study of the wind loads on a cooling tower by a stationary tornado-like vortex through LES // *J. Fluids Struct. Academic Press*, 2018. Vol. 81. P. 656–672.
118. Ma H. et al. Behavior of HCR semi-rigid joints under complex loads and its effect on stability of steel cooling towers // *Eng. Struct. Elsevier Ltd*, 2020. Vol. 222.
119. Ma H. et al. Experimental and numerical study of new connection systems for a large-span hyperbolic steel cooling tower // *Eng. Struct. Elsevier Ltd*, 2019. Vol. 195. P. 452–468.
120. Ma H. et al. Nonlinear stability of steel cooling towers with semirigid connections // *Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd*, 2021. Vol. 159.
121. Ma H. et al. Stability analysis and performance comparison of large-scale hyperbolic steel cooling towers with different latticed shell systems // *J. Constr. Steel Res. Elsevier Ltd*, 2019. Vol. 160. P. 559–578.
122. Ma T. ting et al. Wind-induced dynamic performance of a super-large hyperbolic steel-truss cooling tower // *Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd*, 2020. Vol. 157.
123. Murali G., Vardhan C.M.V., Reddy B.V.P.K. Response of cooling towers to wind loads // *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2012. Vol. 7, № 1. P. 114–120.
124. Niemann H.J., Köpper H.D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers // *Eng. Struct. Elsevier Sci Ltd*, 1998. Vol. 20, № 10. P. 874–880.
125. Niemann H.J., Ruhwedel J. Full-scale and model tests on wind-induced, static and dynamic stresses in cooling tower shells // *Eng. Struct.* 1980. Vol. 2, № 2. P. 81–89.

126. Noorzaei J. et al. Nonlinear interactive analysis of cooling tower-foundation-soil interaction under unsymmetrical wind load // *Thin-Walled Struct.* 2006. Vol. 44, № 9. P. 997–1005.
127. Ruscheweyh H. Wind loadings on hyperbolic natural draught cooling towers // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 1975. Vol. 1, № C. P. 335–340.
128. Shi L. et al. Influence of steel tower on the heat transfer characteristics of indirect air cooled radiator // *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao* *Journal Beijing Jiaotong Univ. Journal Northern Jiaotong University*, 2017. Vol. 41, № 4. P. 70–76.
129. Sun T., Zhou L. Wind pressure distribution around a ribless hyperbolic cooling tower // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 1983. Vol. 14, № 1–3. P. 181–192.
130. Tschanz T., Davenport A.G. The base balance technique for the determination of dynamic wind loads // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 1983. Vol. 13, № 1–3. P. 429–439.
131. WANG K. et al. Three-dimensional regularities of distribution of air-inlet characteristic velocity in natural-draft wet cooling tower* * Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (Grant No. Z2003F03). // *J. Hydrodyn.* 2008. Vol. 20, № 3. P. 323–330.
132. Wang H., Ke S. Extreme wind pressure of a super-large cylindrical-cone steel cooling tower based on large eddy simulation // *Zhendong Yu Chongji* *Journal Vib. Shock. Chinese Vibration Engineering Society*, 2018. Vol. 37, № 7. P. 69–76.
133. Waszczyszyn Z. et al. Nonlinear analysis of a RC cooling tower with geometrical imperfections and a technological cut-out // *Eng. Struct.* Elsevier BV, 2000. Vol. 22, № 5. P. 480–489.
134. Wei Q. ding et al. A study of the unfavorable effects of wind on the cooling efficiency of dry cooling towers // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 1995. Vol. 54–55, № C. P. 633–643.
135. Wu J. et al. Nonlinear stability analysis of steel cooling towers considering imperfection sensitivity // *Thin-Walled Struct.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 146.
136. Xu N. et al. A volumetric change detection framework using UAV oblique photogrammetry—a case study of ultra-high-resolution monitoring of progressive building collapse // *Int. J. Digit. Earth.* Taylor and Francis Ltd., 2021. Vol. 14, № 11. P. 1705–1720.

137. Xu Y. et al. Influence of wind pressure distribution on wind-induced responses and local stability of a cooling tower // *Zhendong Yu Chongji Journal Vib. Shock. Chinese Vibration Engineering Society*, 2016. Vol. 35, № 19. P. 63–69.
138. Xu Y., Bai G. Random buckling bearing capacity of super-large cooling towers considering stochastic material properties and wind loads // *Probabilistic Eng. Mech.* 2013. Vol. 33. P. 18–25.
139. Yu M. et al. Wind-resistant design and safety evaluation of cooling towers by reinforcement area criterion // *Eng. Struct. Elsevier Ltd*, 2019. Vol. 193. P. 281–294.
140. Zahlten W., Borri C. Time-domain simulation of the non-linear response of cooling tower shells subjected to stochastic wind loading // *Eng. Struct. Elsevier Sci Ltd*, 1998. Vol. 20, № 10. P. 881–889.
141. Zhang M. et al. Design wind loads on hyperbolic cooling towers during construction // *Qinghua Daxue Xuebao Journal Tsinghua Univ. Press of Tsinghua University*, 2015. Vol. 55, № 12. P. 1281–1288.
142. Zhang L. et al. Numerical study of the dynamic response of the natural draft dry cooling tower under crosswind condition // *Case Stud. Therm. Eng.* 2022. Vol. 34. P. 102027.
143. Zhang J.F. et al. Wind induced dynamic responses on hyperbolic cooling tower shells and the equivalent static wind load // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier B.V.*, 2017. Vol. 169. P. 280–289.
144. Zhang J.F. et al. Wind tunnel investigation on wind-pressure interference effects for two large hyperboloidal cooling towers // *Harbin Gongye Daxue Xuebao Journal Harbin Inst. Technol.* 2011. Vol. 43, № 4. P. 81–87.
145. Zhang M., Wang H.L. Construction simulation and construction speed analysis of natural draft cooling towers // *Appl. Mech. Mater.* 2013. Vol. 353–354. P. 3559–3565.
146. Zhang X., Zheng Y., Wang Q. Numerical Analysis of the Inner and Outer Flow Field of an Air-cooling Tower // *Reneng Dongli Gongcheng Journal Eng. Therm. Energy Power.* 2000. Vol. 15, № 1. P. 52–54.
147. Zhao L. et al. Aerodynamic and aero-elastic performances of super-large cooling towers // *Wind Struct. Int. J. Techno-Press*, 2014. Vol. 19, № 4. P. 443–465.
148. Zhao L. et al. Distribution pattern of fluctuating wind pressures on cooling towers in grouped rectangular arrangement // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier B.V.*, 2022. Vol. 224.

149. Zhao L. et al. Full-scale measurement and distribution rules of surface fluctuating wind pressure of a large cooling tower // *Tumu Gongcheng Xuebao* China Civ. Eng. J. Editorial Office of China Civil Engineering Journal, 2017. Vol. 50, № 1. P. 1–11.
150. Zhao L. et al. Optimal structural design searching algorithm for cooling towers based on typical adverse wind load patterns // *Thin-Walled Struct.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 151.
151. Zhao L. et al. Wind tunnel investigation on wind-induced interference effects for supere large cooling towers // *Gongcheng Lixue* Engineering Mech. 2009. Vol. 26, № 1. P. 149–154.
152. Zhao L., Ge Y.J., Cao F.C. Equivalent beam-net design theory of aero-elastic model about hyperbolic thin-shell cooling towers and its experimental investigation // *Zhendong Gongcheng Xuebao* Journal Vib. Eng. 2008. Vol. 21, № 1. P. 31–37.
153. Zhao L., Ge Y.J. Wind loading characteristics of super-large cooling towers // *Wind Struct. Int. J.* Techno Press, 2010. Vol. 13, № 3. P. 257–273.
154. Zhou X. et al. Study on interference effect of cooling towers under condition of tower-tower and hilly surroundings // *Jianzhu Jiegou Xuebao* Journal Build. Struct. Science Press, 2014. Vol. 35, № 12. P. 140–148.
155. Кузнецов С.Г. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.23.01 “Роль строительной аэродинамики в проектировании зданий и сооружений”: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Макеевка: Донбасская государственная академия строительства и архитектуры, 1999. 199 р.
156. Кузнецов С.Г. Роль строительной аэродинамики в проектировании зданий и сооружений // *Вісник Донбаської Національної Академії Будівництва і Архітектури.* 2008. Vol. 74, № 6. P. 120–125.
157. Гаранжа И.М. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 05.23.01 “Напряженно-деформированное состояние металлических многогранных стоек с учетом обенностей ветрового воздействия”: диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2012. 172 р.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. (Справка о внедрении)

Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственное предприятие
«ДОНТЕХЭКСПЕРТ»

Свидетельство о гос. регистрации: серия АА03 № 24205
Идентификационный код: 50005566

Адрес: ДНР 83114, г. Донецк, ул. Университетская, 80
Телефон / факс: (062) 388-36-16
E-mail: cd@dontehexpert.ru

ДОНТЕХЭКСПЕРТ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

Исх. № 11/10-257 от « 14 » ноября 20 22 г.

Вх. № _____ от « ____ » _____ 20 ____ г.

Диссертационный совет
Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия
строительства и архитектуры»

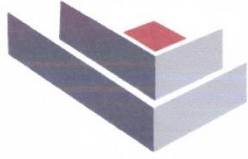
О внедрении результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы соискателя *Титкова С.О.* на тему «Уточнение ветровой нагрузки на башенные металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения» приняты для составления программы обследования и оценки остаточного ресурса, эксплуатационной пригодности башенной градирни №4 цеха улавливания химических продуктов коксования филиала №6 «Ясиновский коксохимический завод». Работа выполнялась в рамках договора №666_50 от 09.09.2019 г. по теме «Обследование и оценка технического состояния строительных конструкций башенной градирни №4 цеха улавливания химических продуктов коксования расположенной адресу ДНР, г. Макеевка, ул. 50 лет образования СССР, 5. Техническое заключение».

С уважением,
Генеральный директор
ООО «НПП «Донтехэксперт»



В.Т. Коява



Общество с ограниченной ответственностью
«ГПК ИНЖИНИРИНГ»

ДНР 83014, г. Донецк, Калининский район, проспект Дзержинского, дом 16
 т/с 40702810920710000048 в ЦРБ ДНР, БИК 310101001
 ИКЮЛ 35832507
 Телефон/факс (062) 304-08-08.
 E-mail: gpk-inzhiniring@mail.ru

Исх.№119 от «14» ноября 2022 г.

Вх.№ ___ от «__» _____ 20__ г.

Диссертационный совет
 Д 01.006.02

при ГОУ ВПО «Донбасская
 национальная академия
 строительства и архитектуры»

**О внедрении результатов
 диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы соискателя **Титкова С.О.** на тему «Уточнение ветровой нагрузки на башенные металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения» приняты для проектирования металлических башенных каркасно-обшивных градирен.

С уважением,
 Директор ООО «ГПК ИНЖИНИРИНГ»



С.Ф. Кибкало

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

(Справка о внедрении в учебный процесс)



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**
**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, иденг. код 02070795

от 14.11.2022 № 16
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Титкова Сергея Олеговича на тему «Уточнение ветровой нагрузки на башенные
металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и этапов
возведения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, зданий и сооружения,
в учебный процесс

Результаты диссертационных исследований Титкова Сергея Олеговича, а именно подходы к уточнению ветровой нагрузки на башенные металлические градирни с учетом особенностей конструктивной формы и этапов возведения, внедрены 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», в 7 семестре, объемом 8 з.е.); Б1.В.ДВ.01.02 «Особенности расчета, проектирования и эксплуатации уникальных зданий и сооружений» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и проектирование зданий и сооружений (МК)», в 3 семестре, объемом 2 з.е.); Б1.В.03 «Технология и организация реконструкции и ремонтно-восстановительных работ» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и практика организационно-технологических и экономических решений», в 2 семестре, объемом 3 з.е.); Б1.В.ДВ.04.01 «Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений» (для направления подготовки 08.04.01 «Строительство», программа «Теория и практика организационно-технологических и экономических решений», в 1 семестре, объемом 3 з.е.), что отображено в учебных планах и рабочих программах дисциплин (модулей).

Члены комиссии:

Первый проректор
д.э.н., профессор

Декан строительного факультета,
к.т.н., доцент

Начальник учебной части,
к.гос.упр., доцент



В.Г. Севка

Э.А. Лозинский

А.А. Сухина

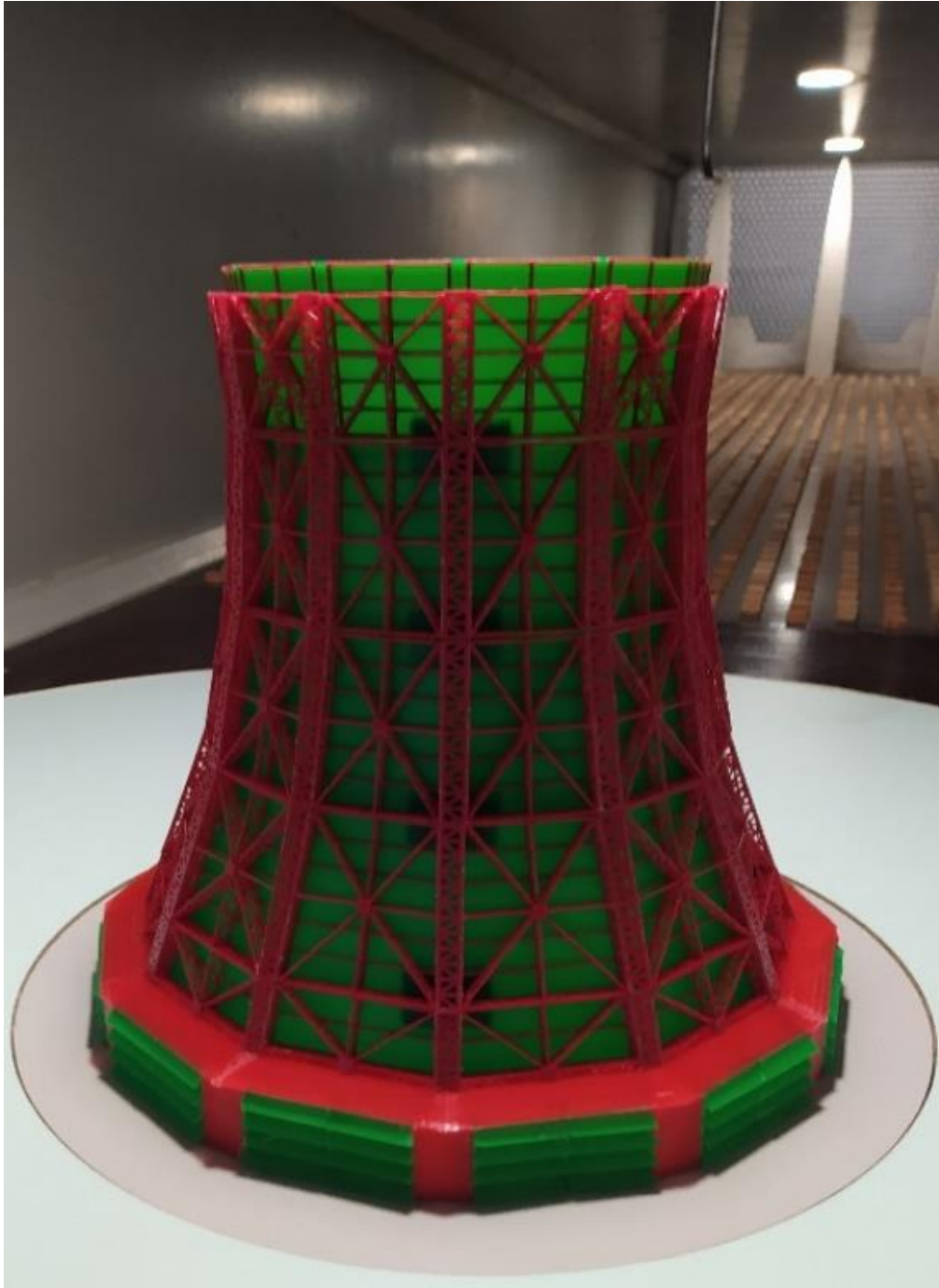
ПРИЛОЖЕНИЕ В.**Экспериментальные данные локальных аэродинамических коэффициентов**

Рисунок В.1 Макет башенной металлической двенадцатигранной градирни гиперболической формы площадью орошения 1600м^2 расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)

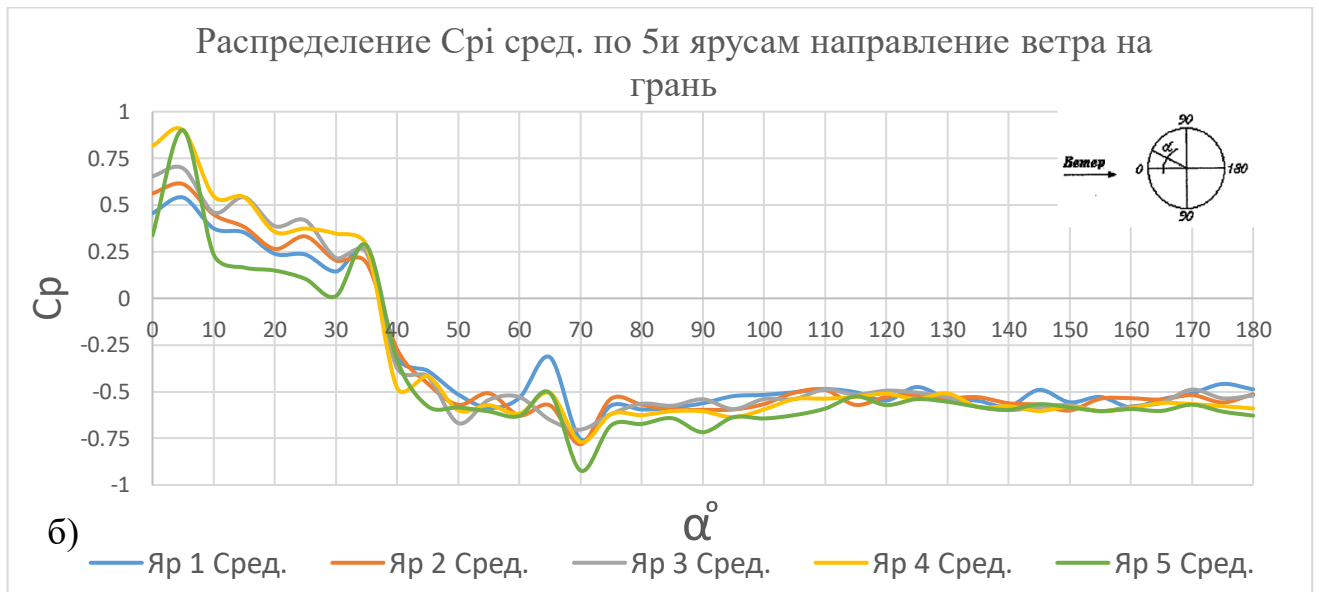
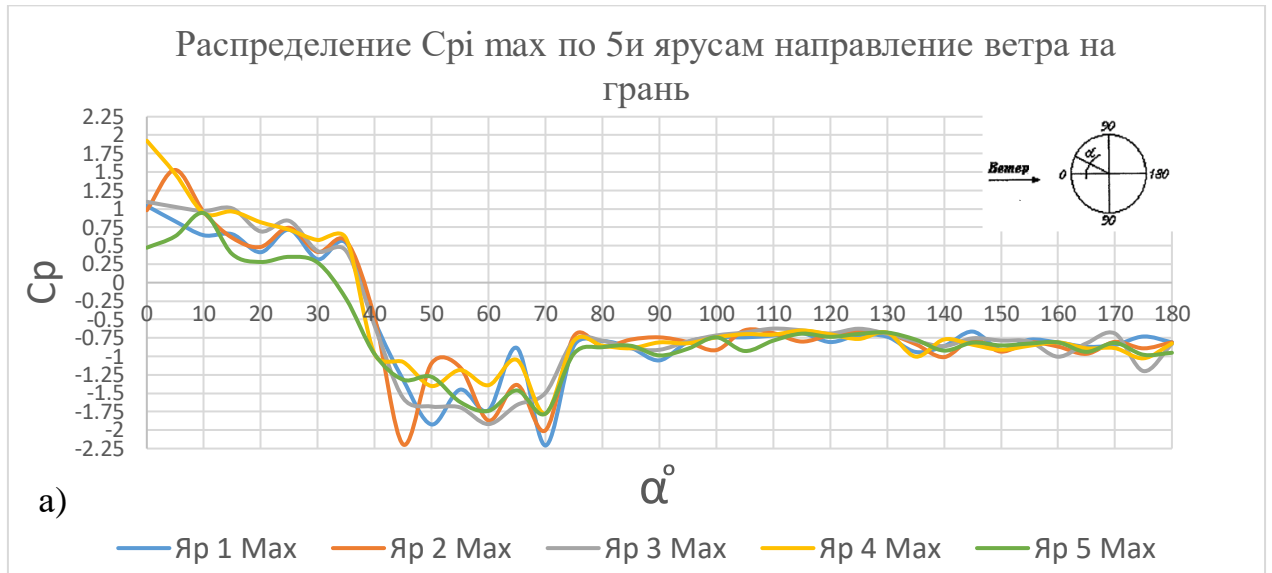
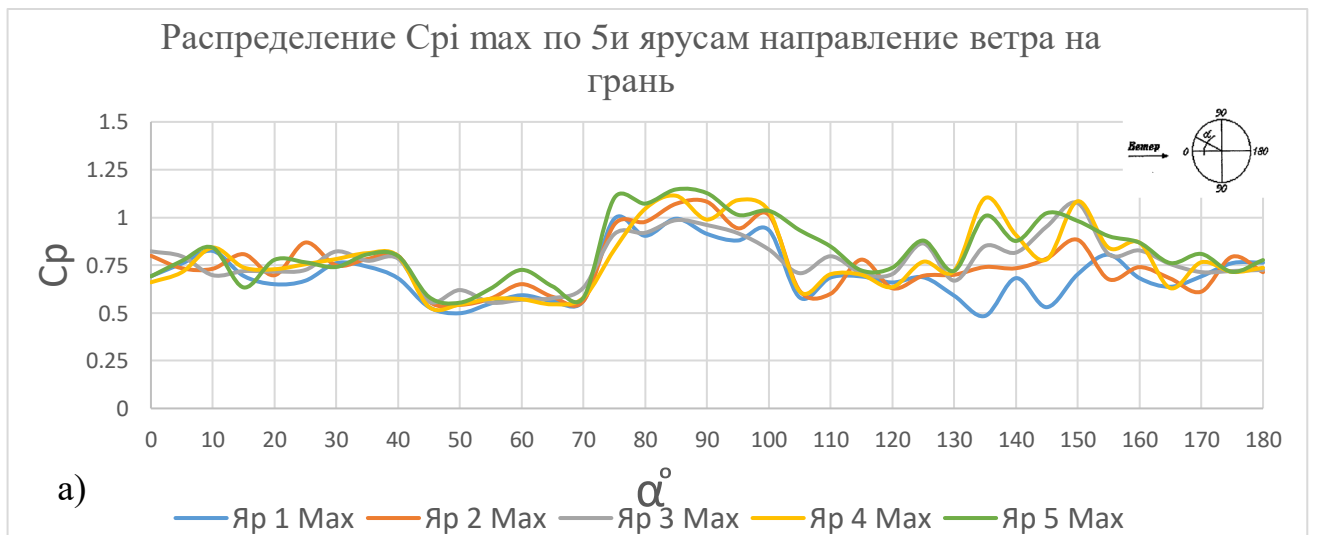


Рисунок В.2 Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.



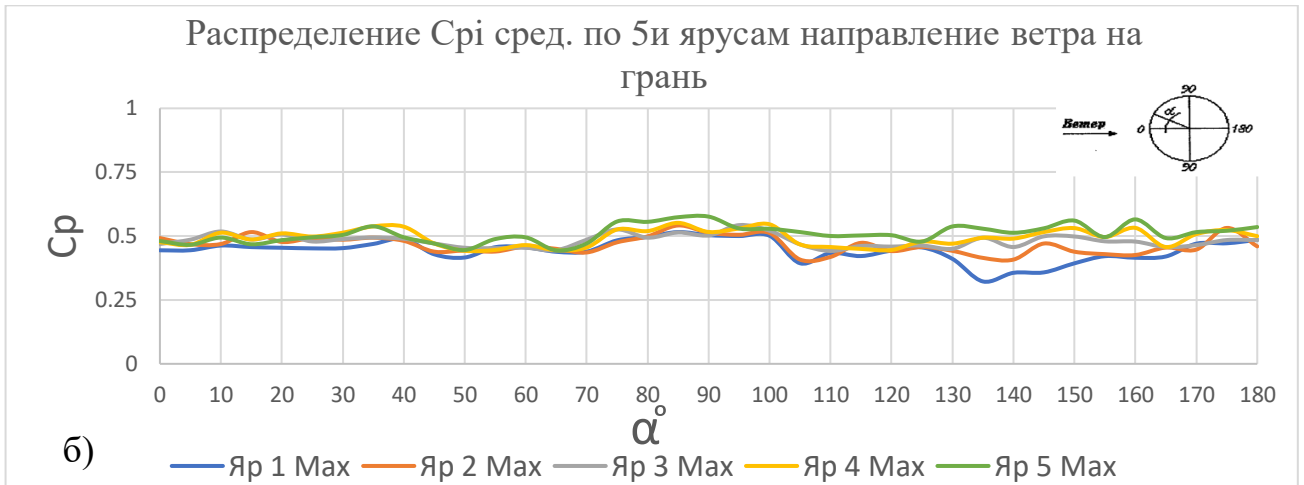


Рисунок В.3 Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} мах по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

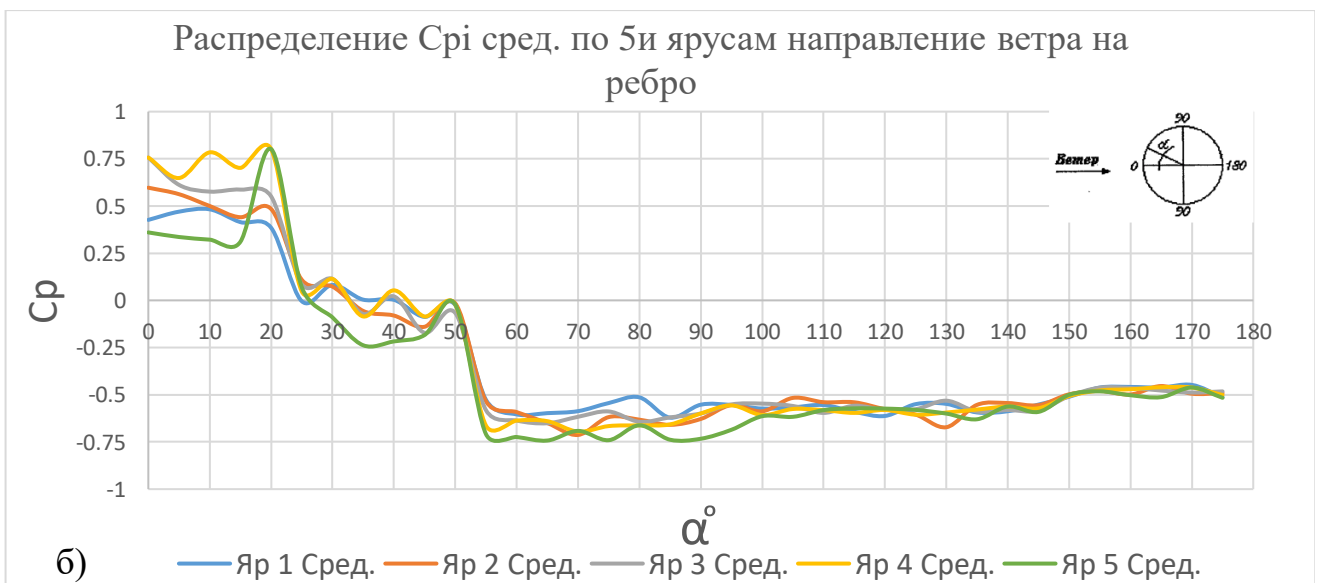
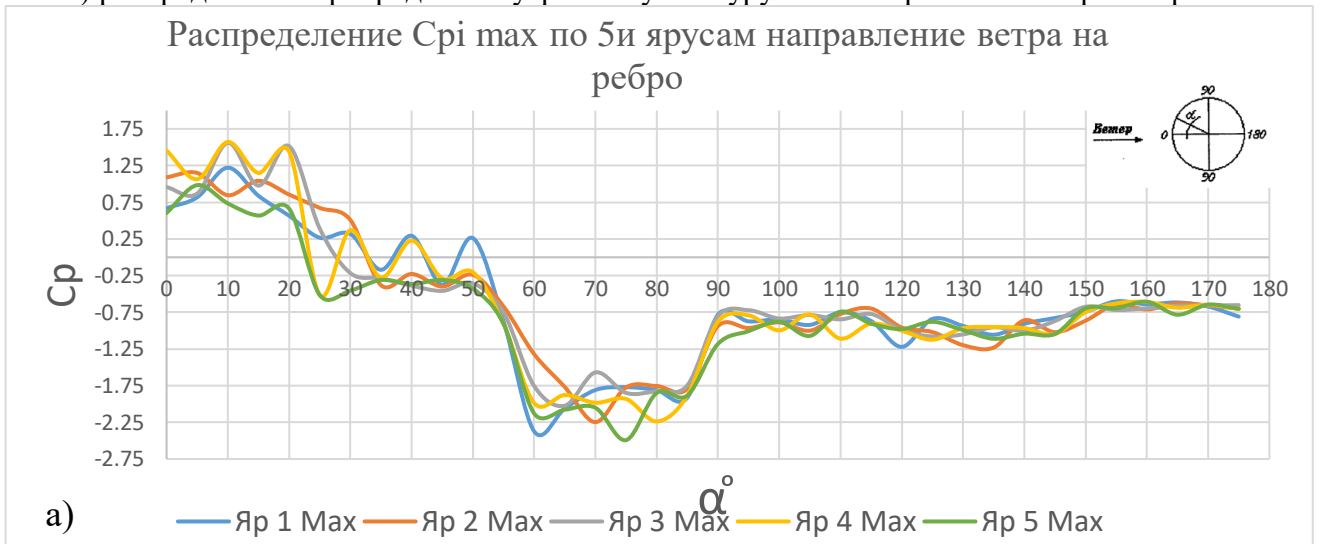


Рисунок В.4. Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} мах по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.

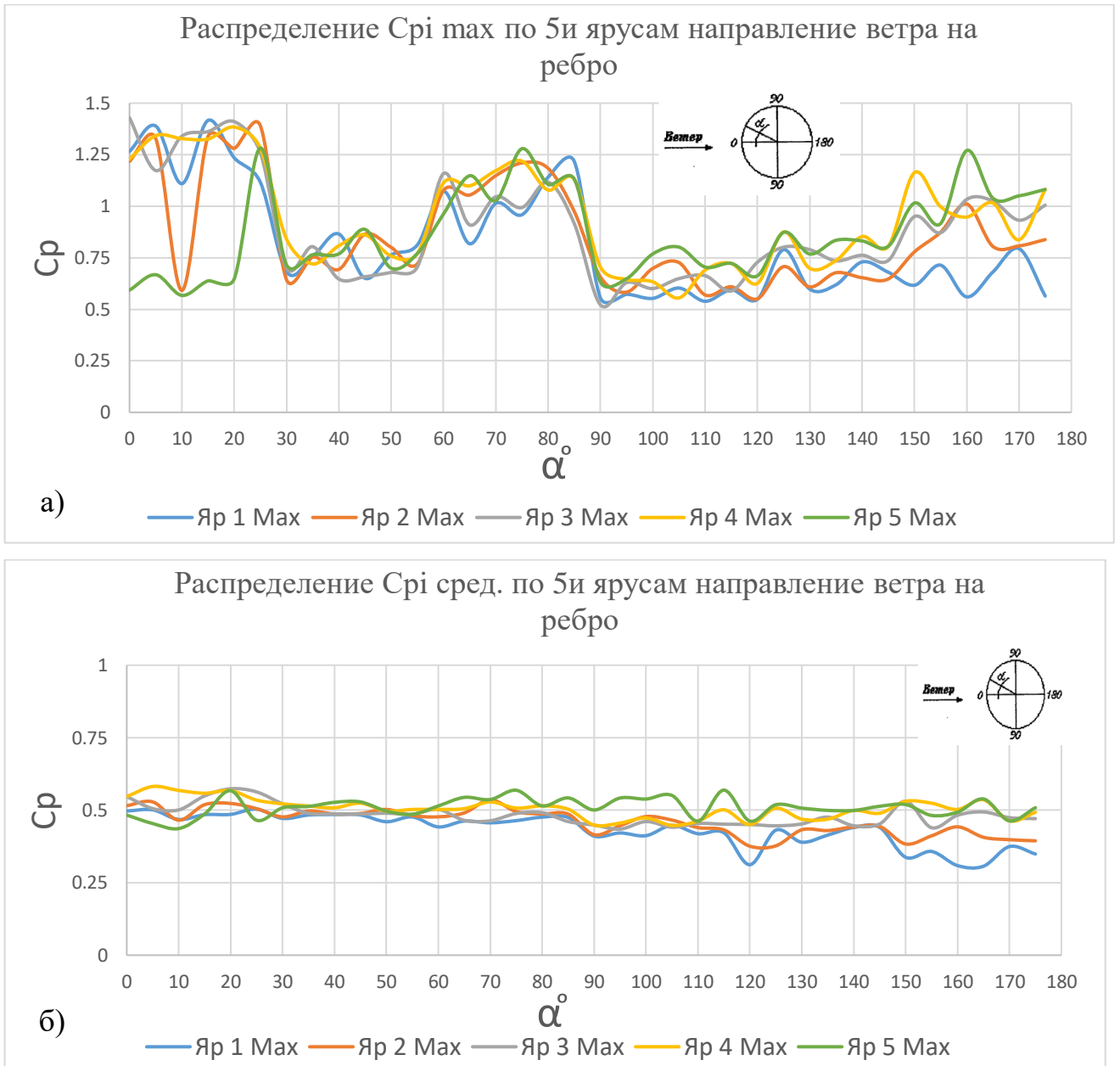


Рисунок В.5 Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро.

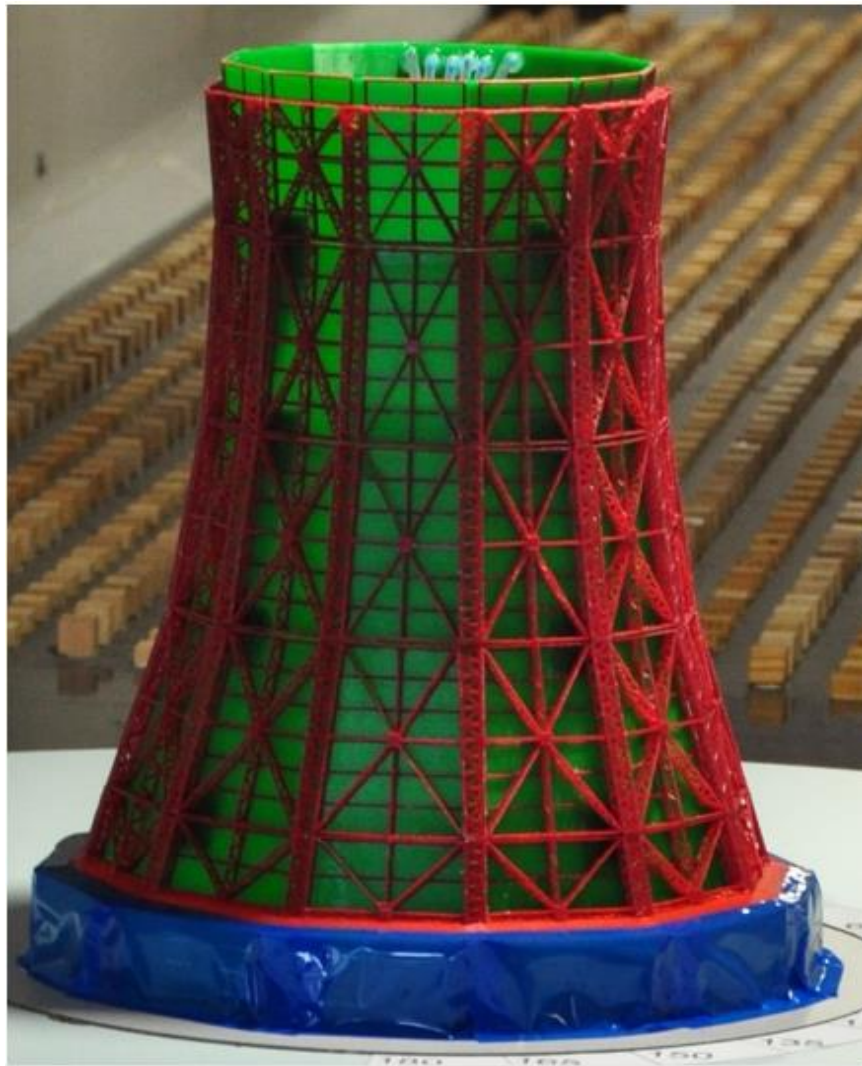
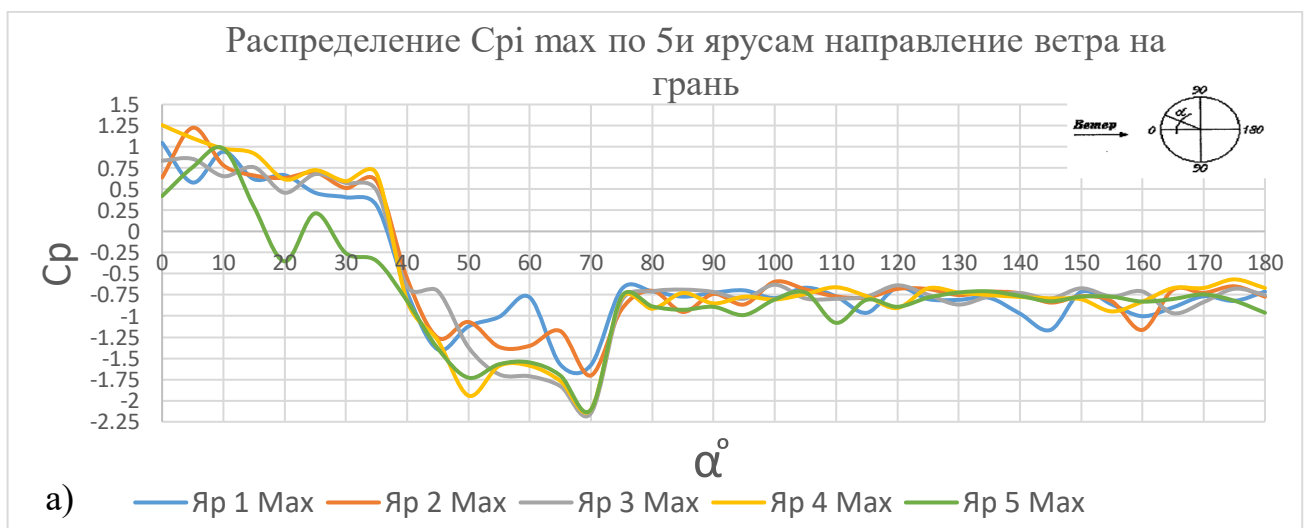


Рисунок В.6 Макет башенной металлической двенадцатигранной градирни гиперболической формы площадью орошения 1600м^2 расположенный в рабочей части МАТ-1(зимний период эксплуатации)



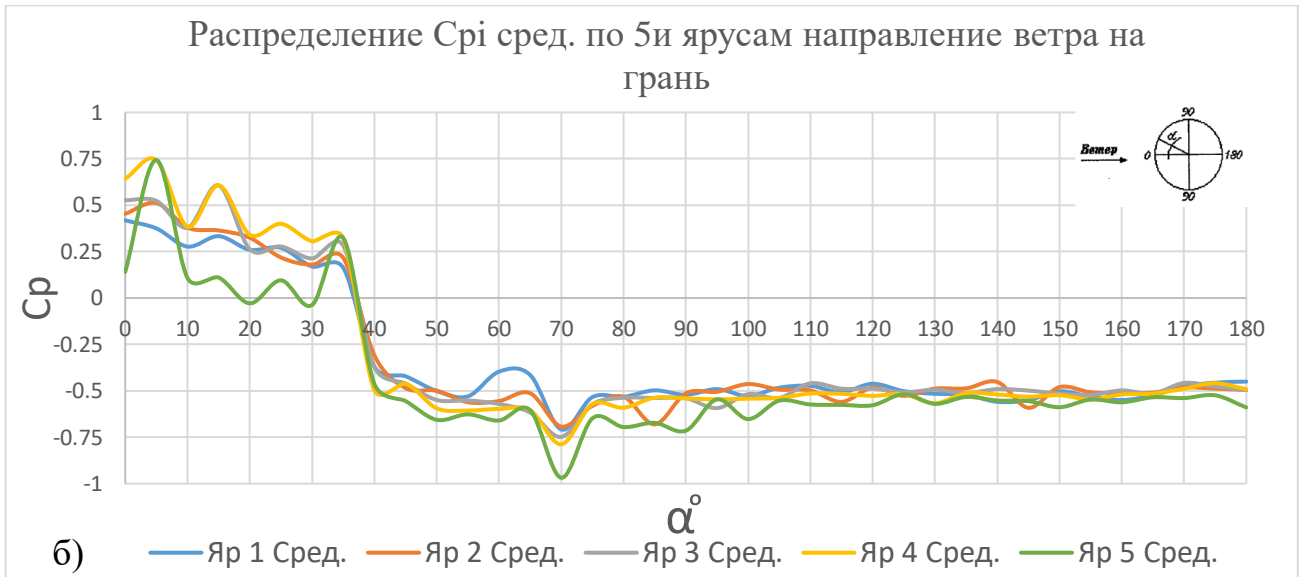


Рисунок В.7 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} тах по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.

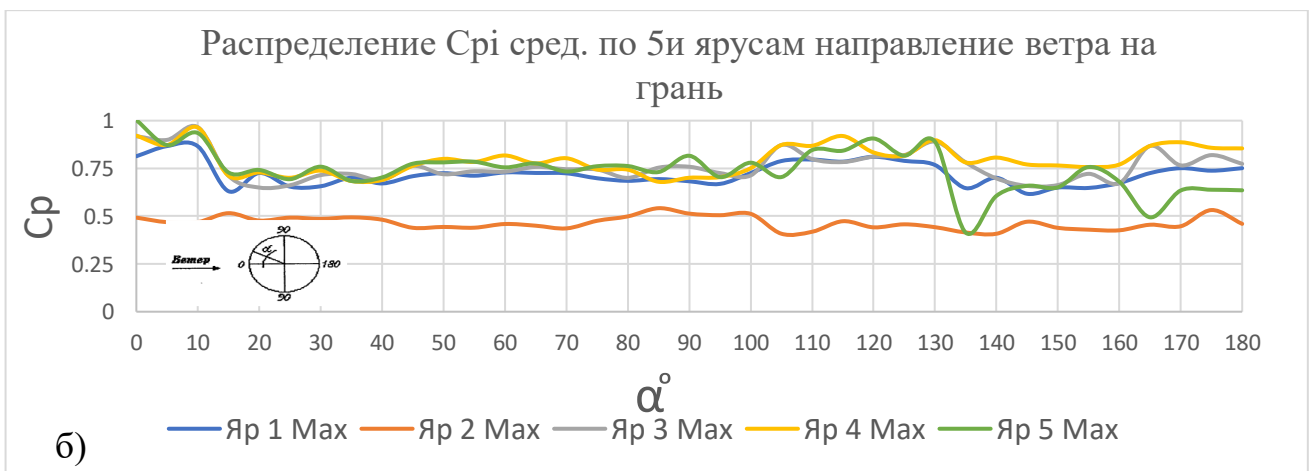
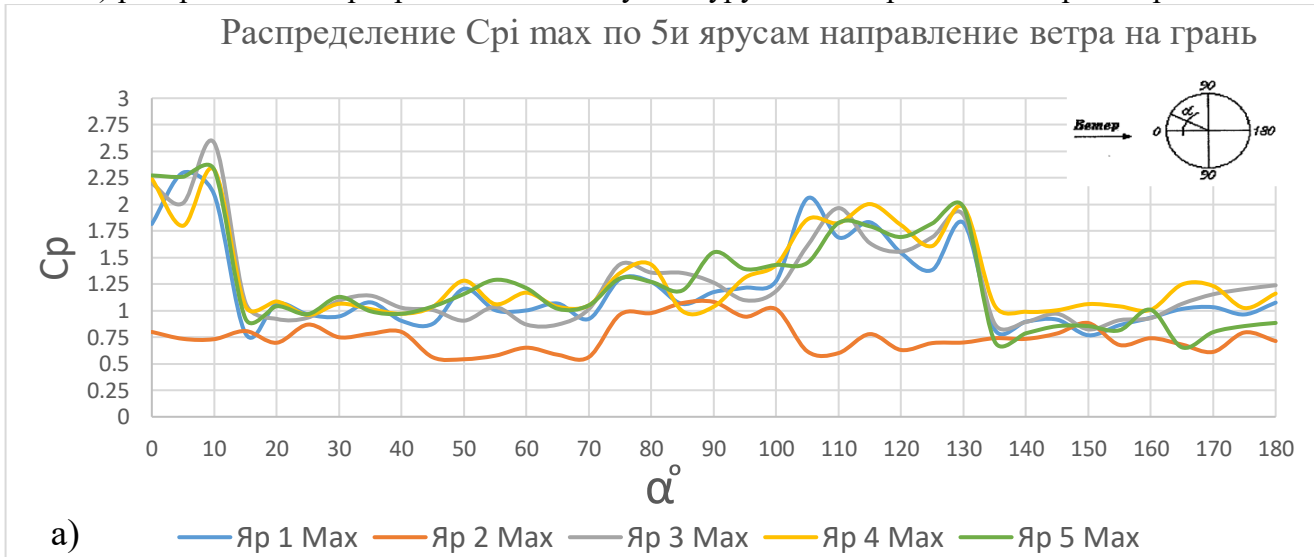


Рисунок В.8 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} тах по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

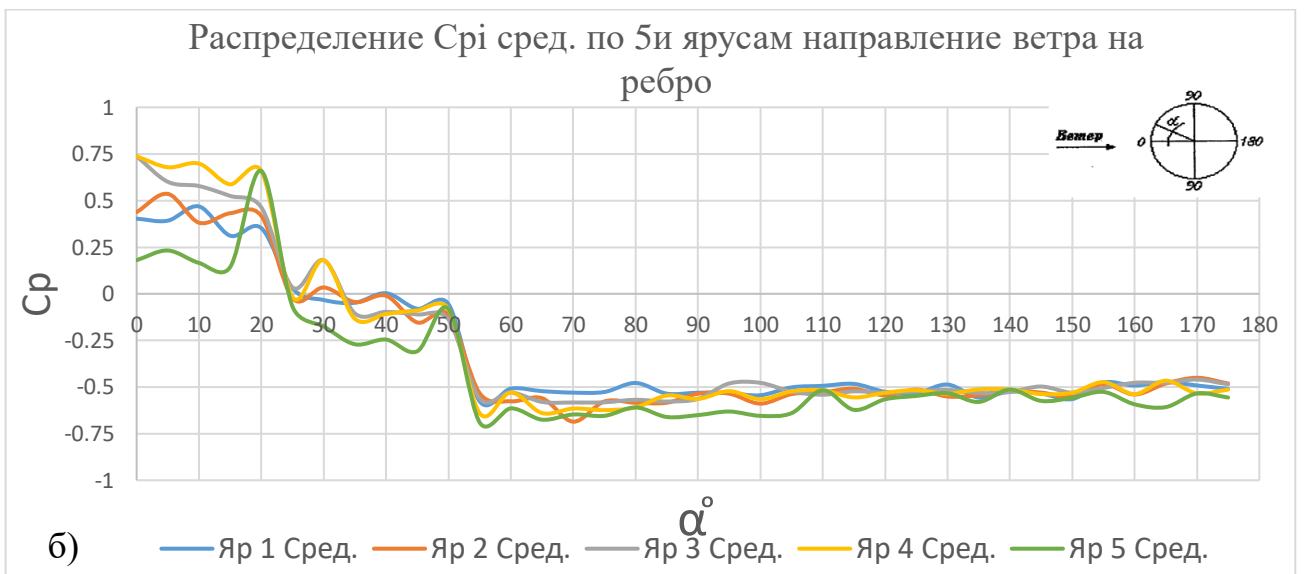
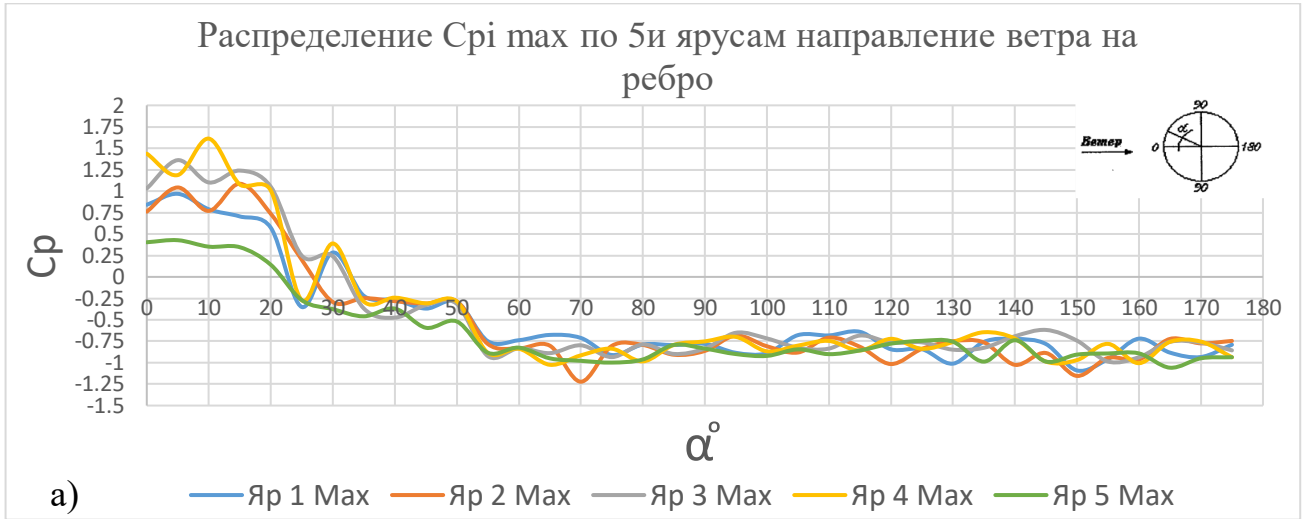
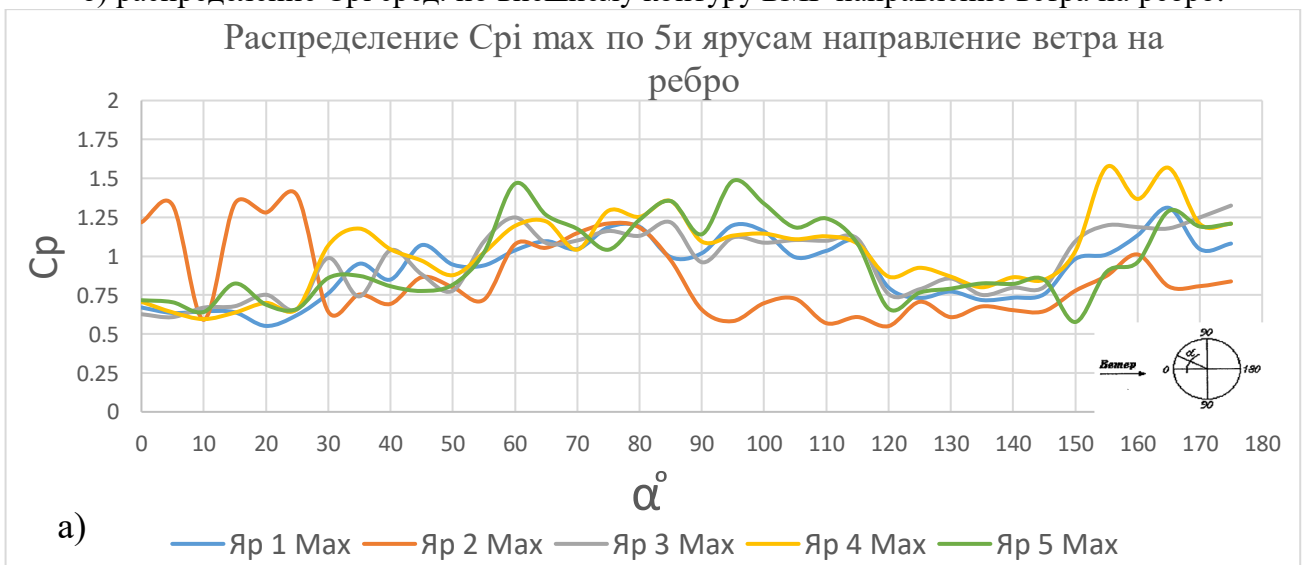


Рисунок В.9 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации:
 а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.



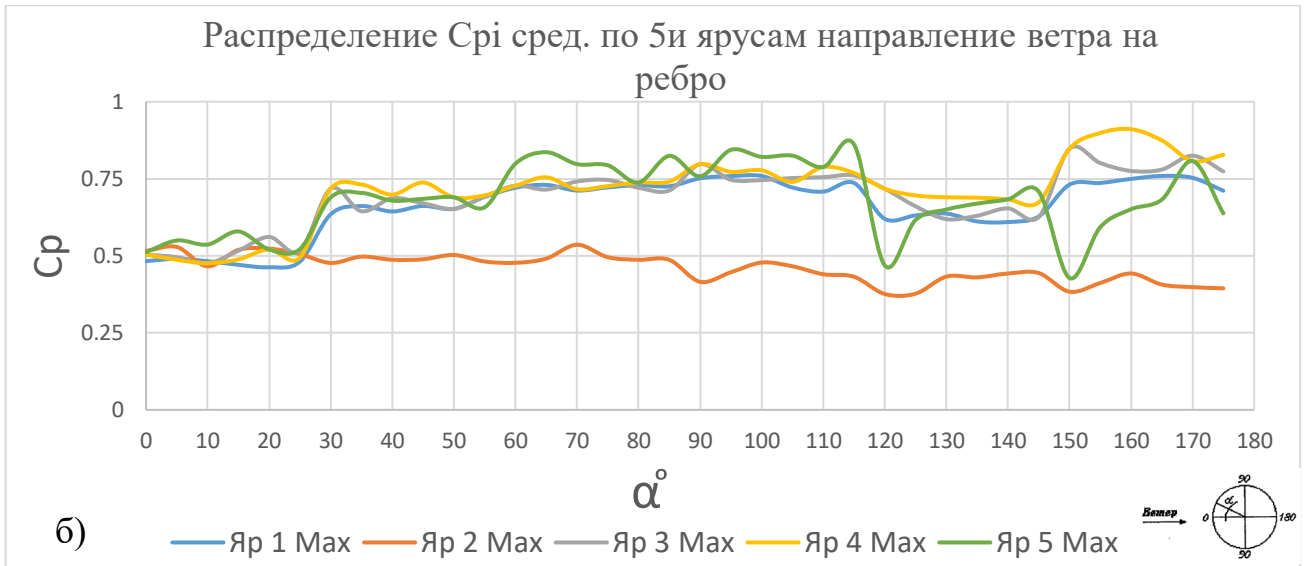


Рисунок В.10 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.
 а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро.

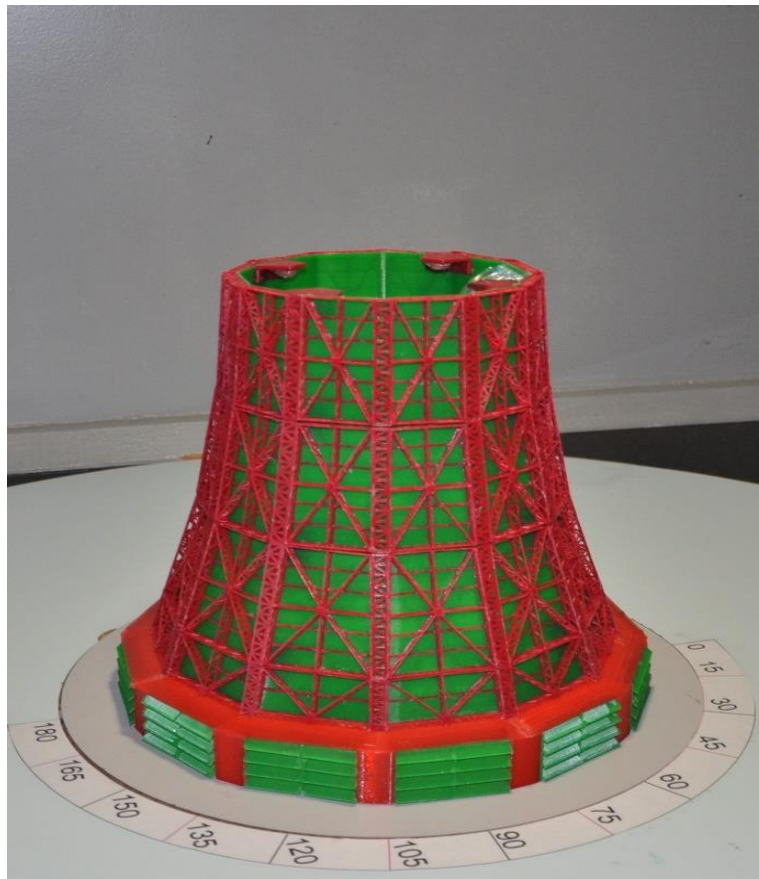


Рисунок В.11 Макет башенной металлической двенадцатигранной градирни гиперболической формы площадью орошения 1600м² расположенный в рабочей части МАТ-1 (монтажная стадия замыкание карт четвертого яруса)

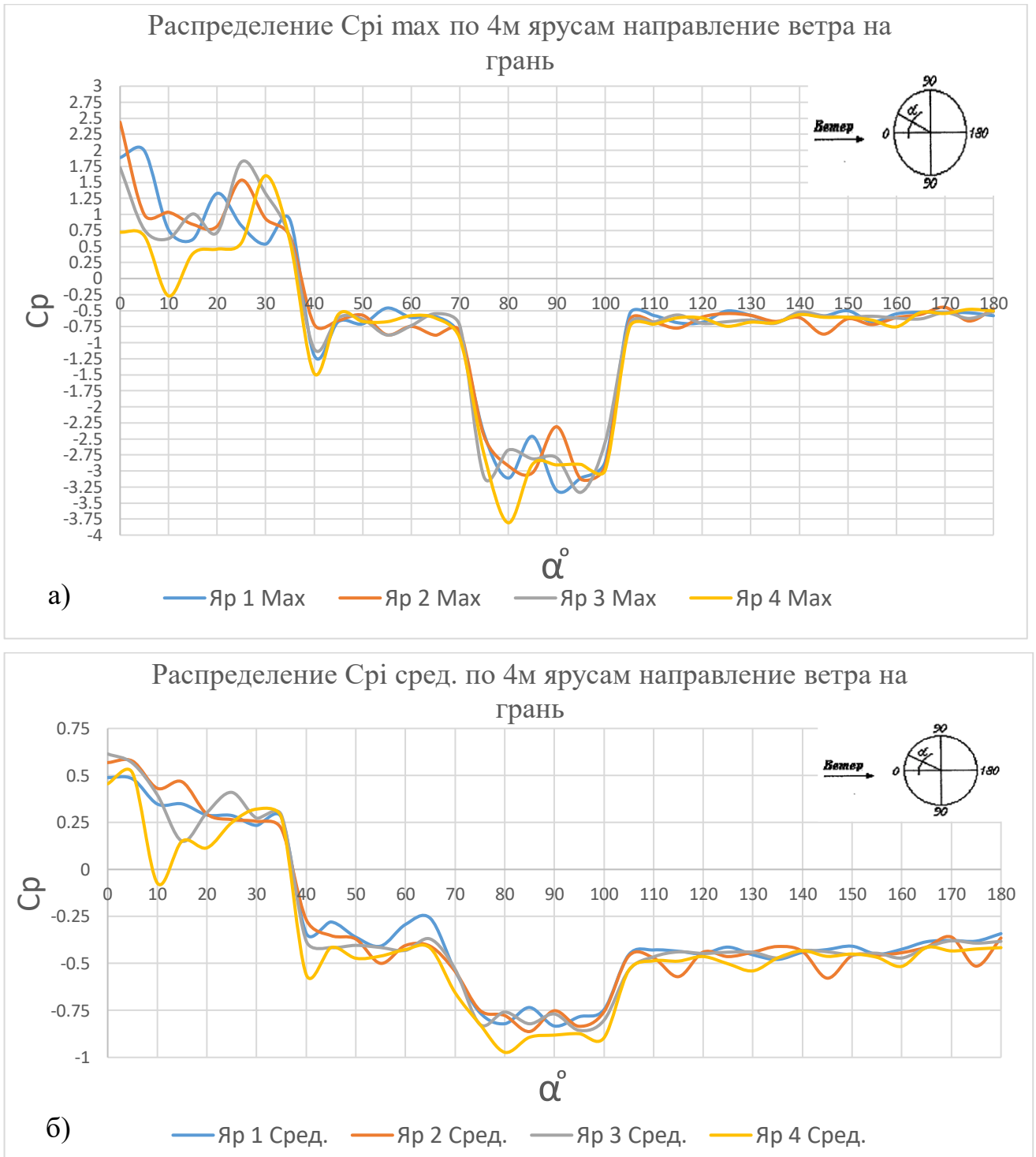


Рисунок В 12 Распределение C_{pi} Монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.

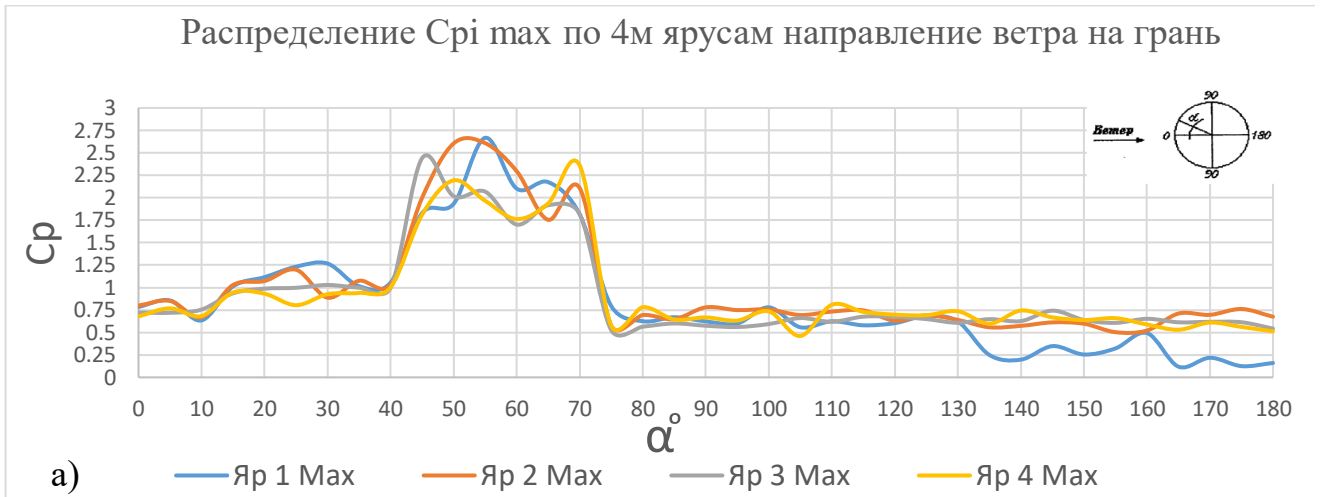
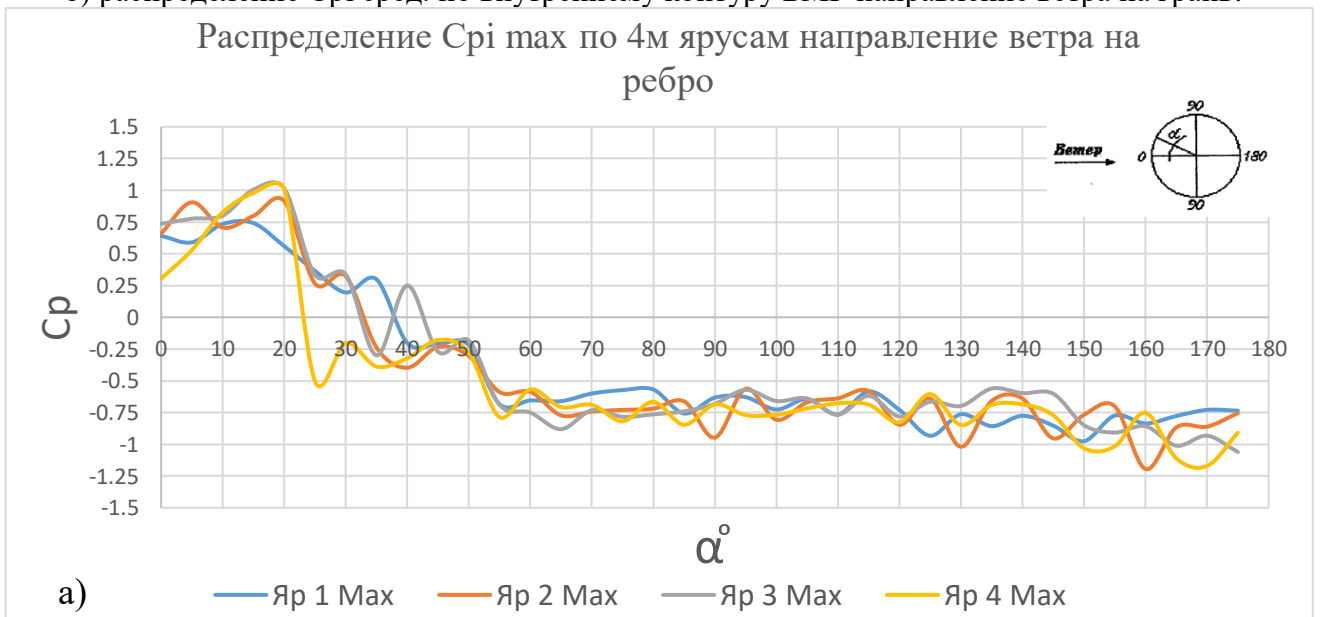


Рисунок В.13 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.



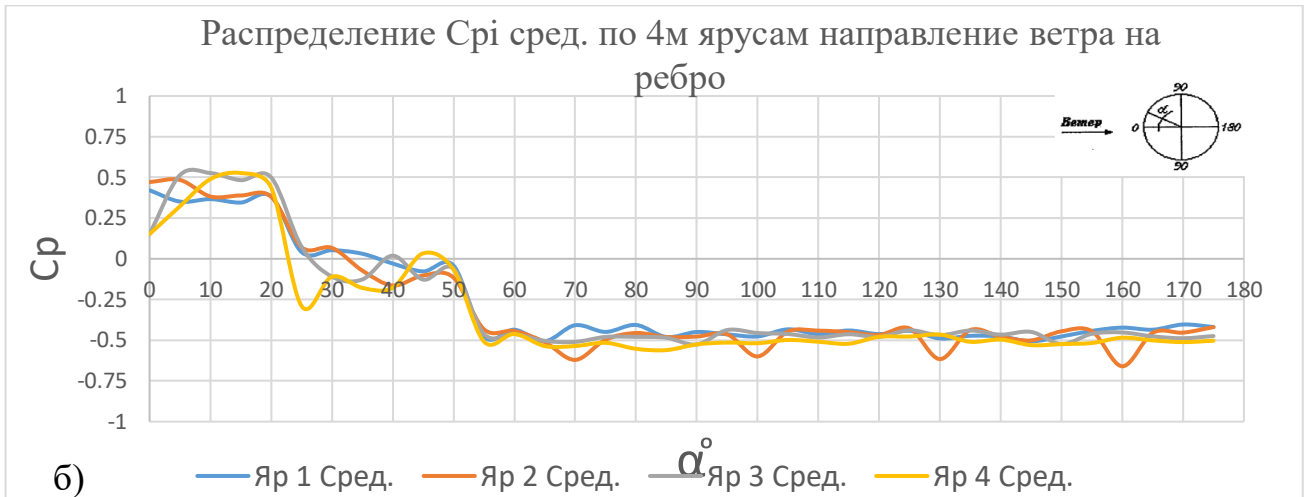


Рисунок В.14 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;

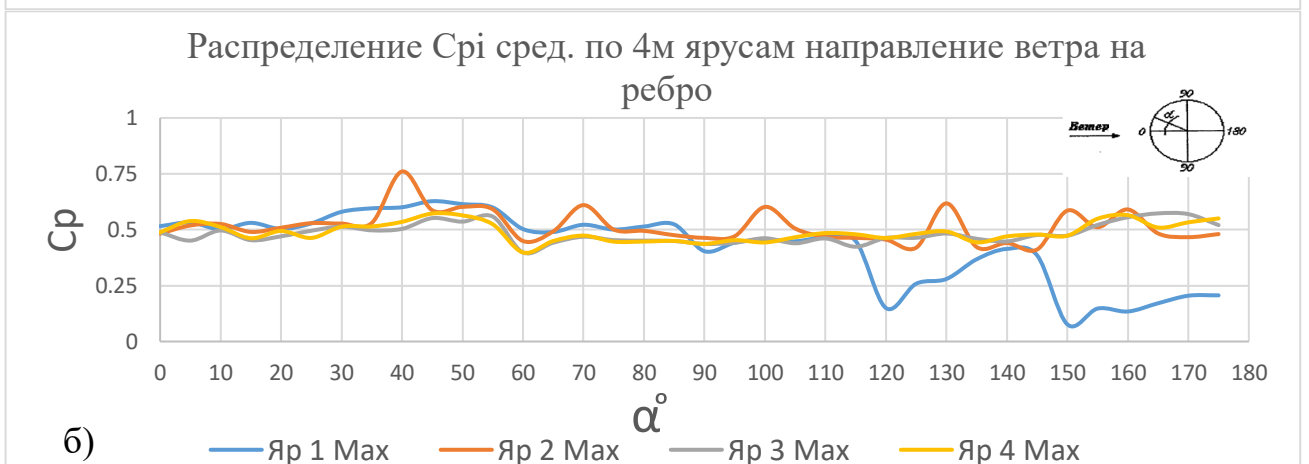
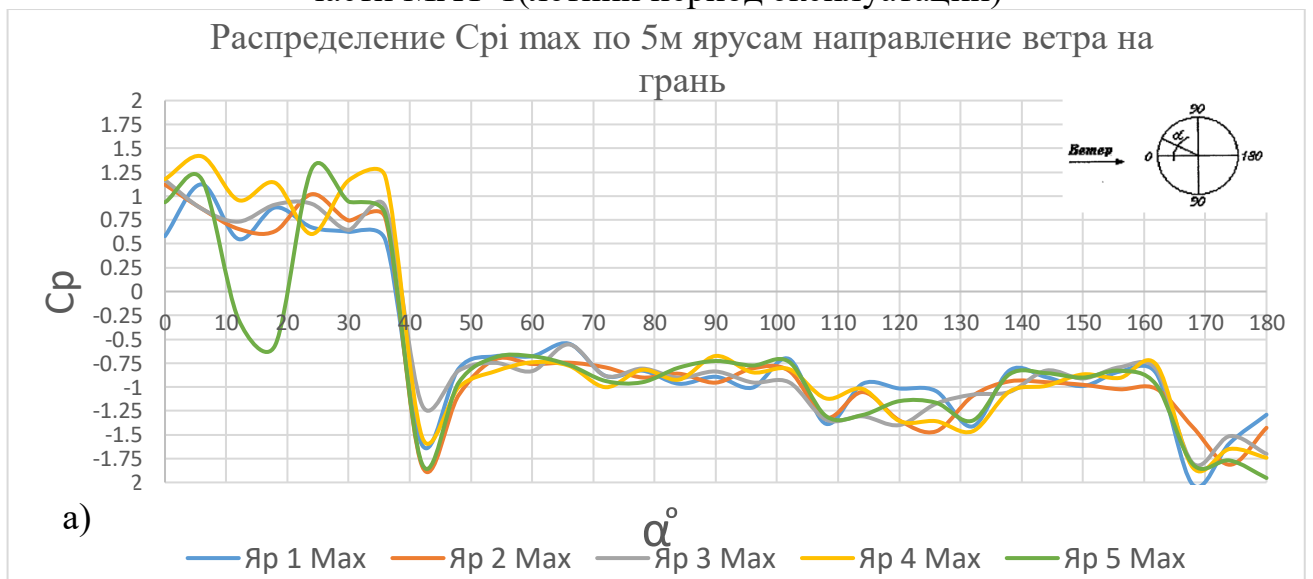


Рисунок В.15 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;



Рисунок В.16 Макет башенной металлической двенадцатигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м^2 расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)



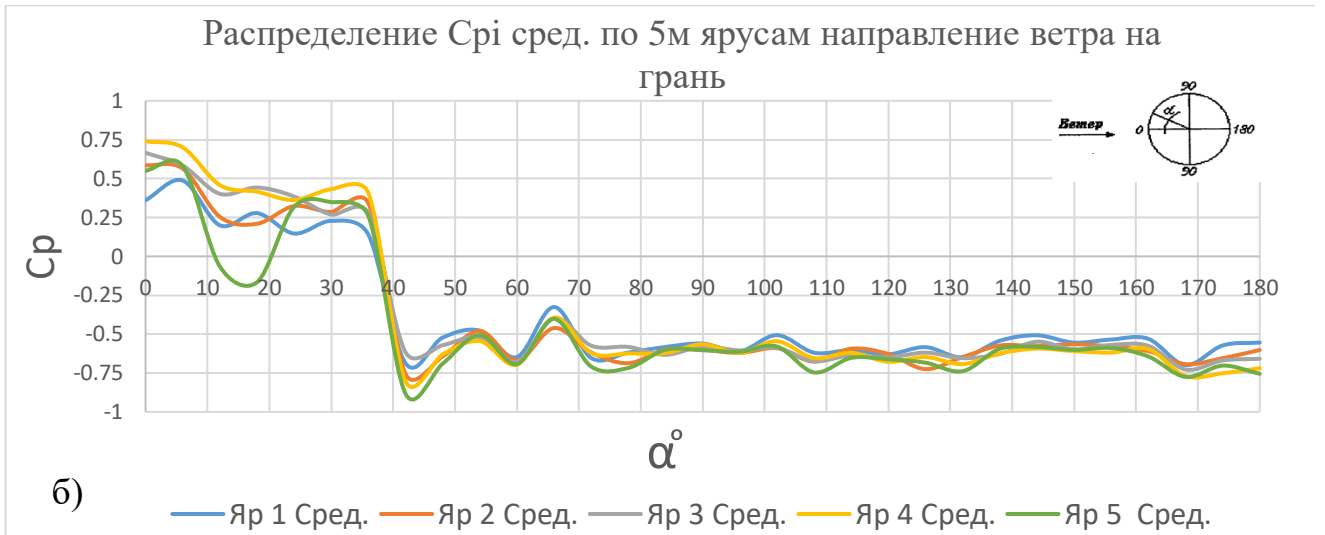


Рисунок В.17 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.

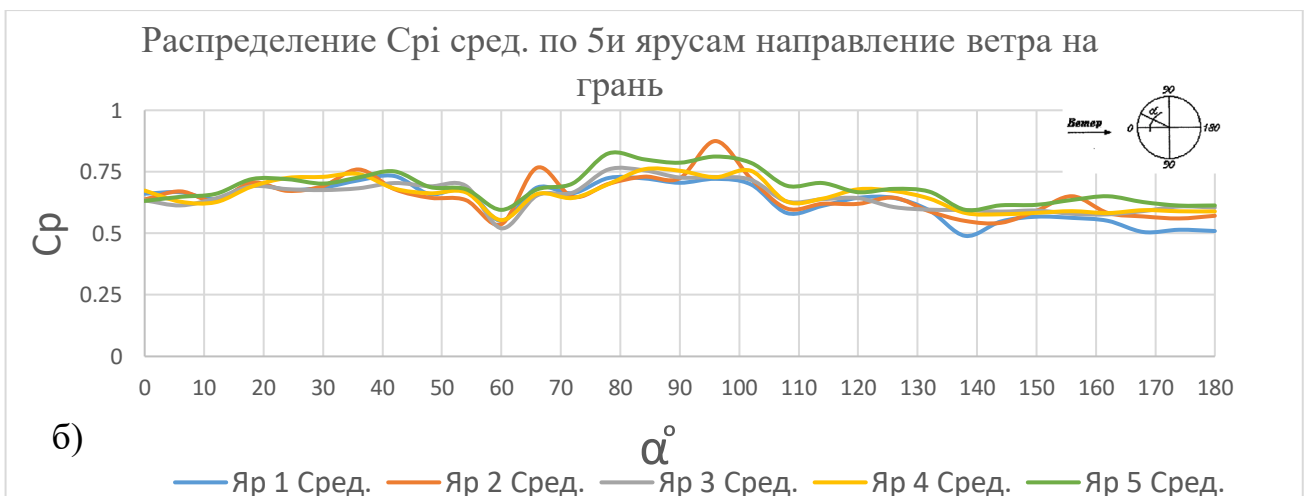
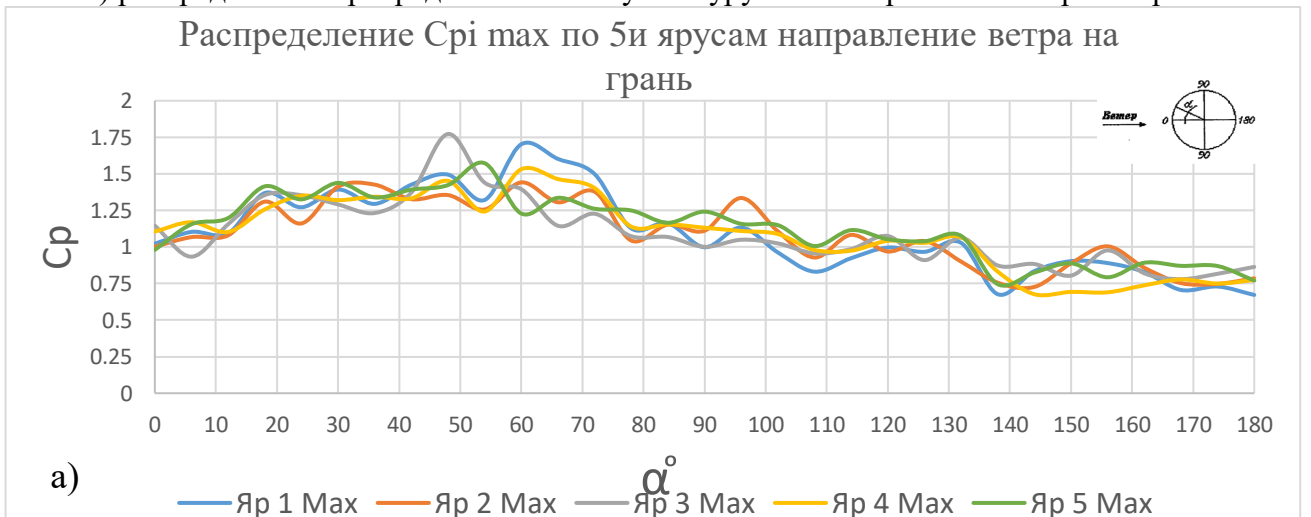


Рисунок В.18 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

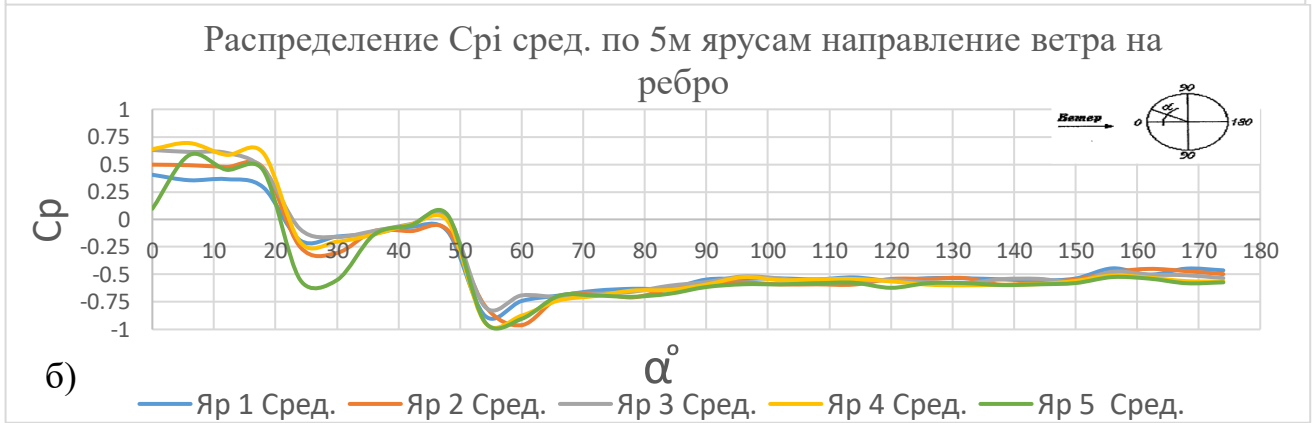
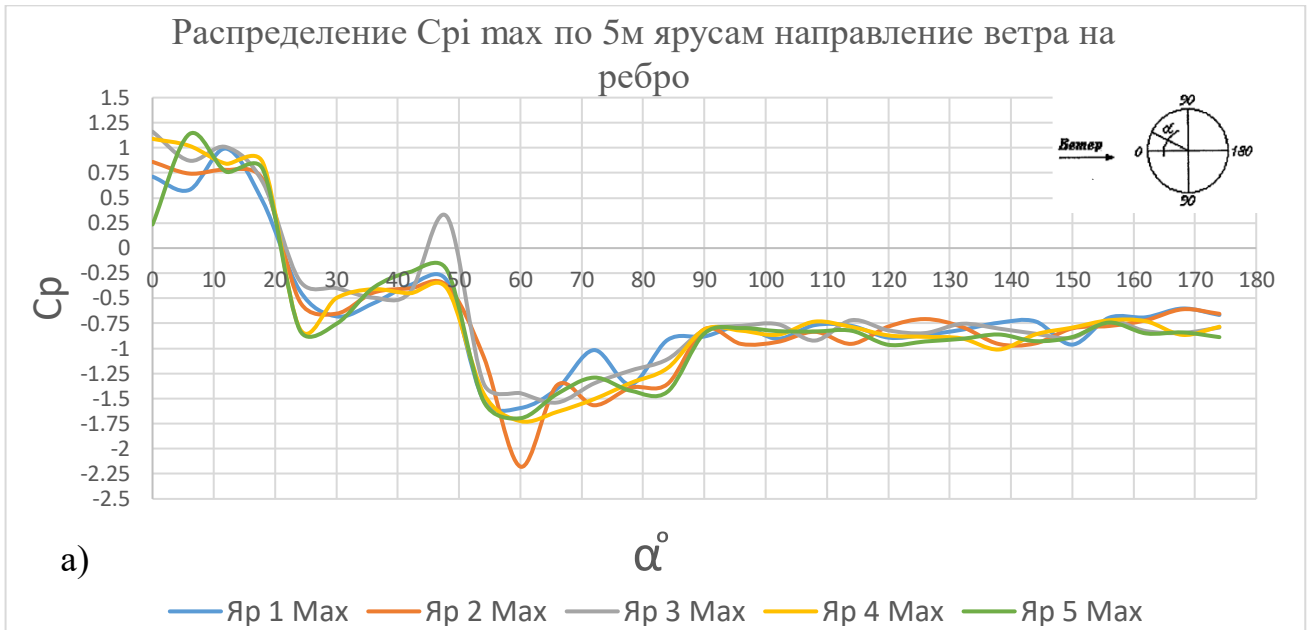


Рисунок В.19 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
- б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.



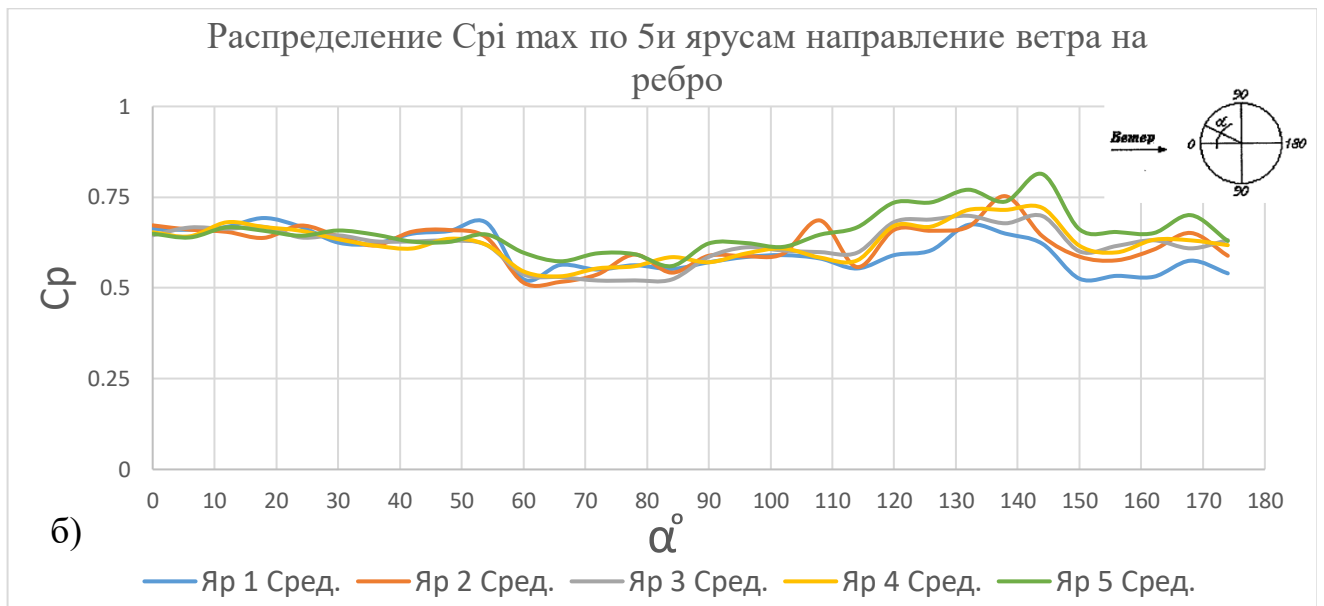


Рисунок В.20 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;

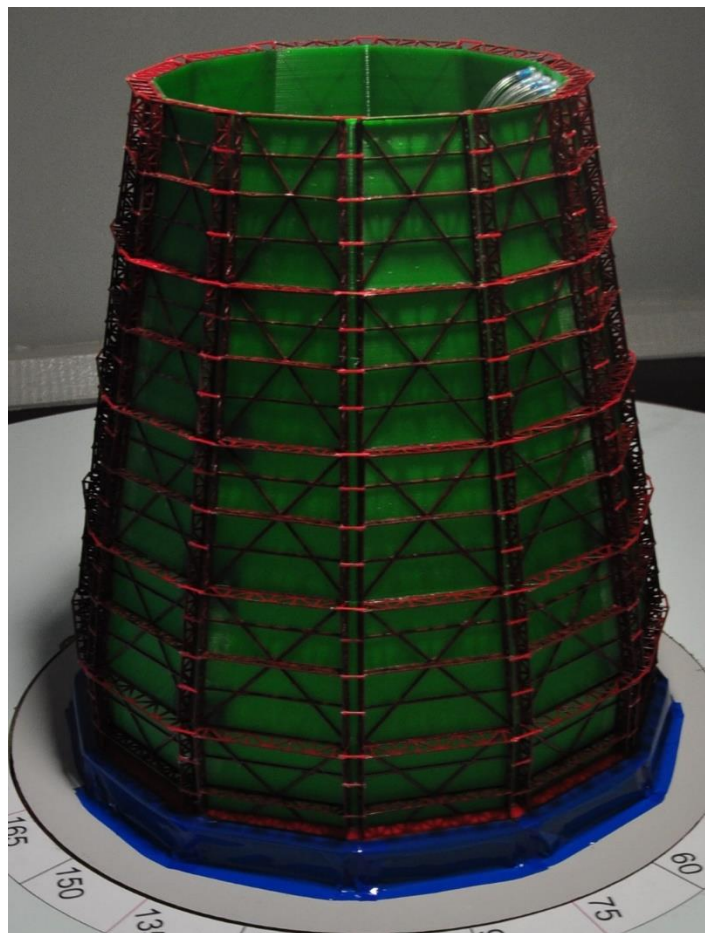


Рисунок В.21 Макет башенной металлической двенадцатигранной градири пирамидальной формы площадью орошения 1600m^2 расположенный в рабочей части МАТ-1(зимний период эксплуатации)

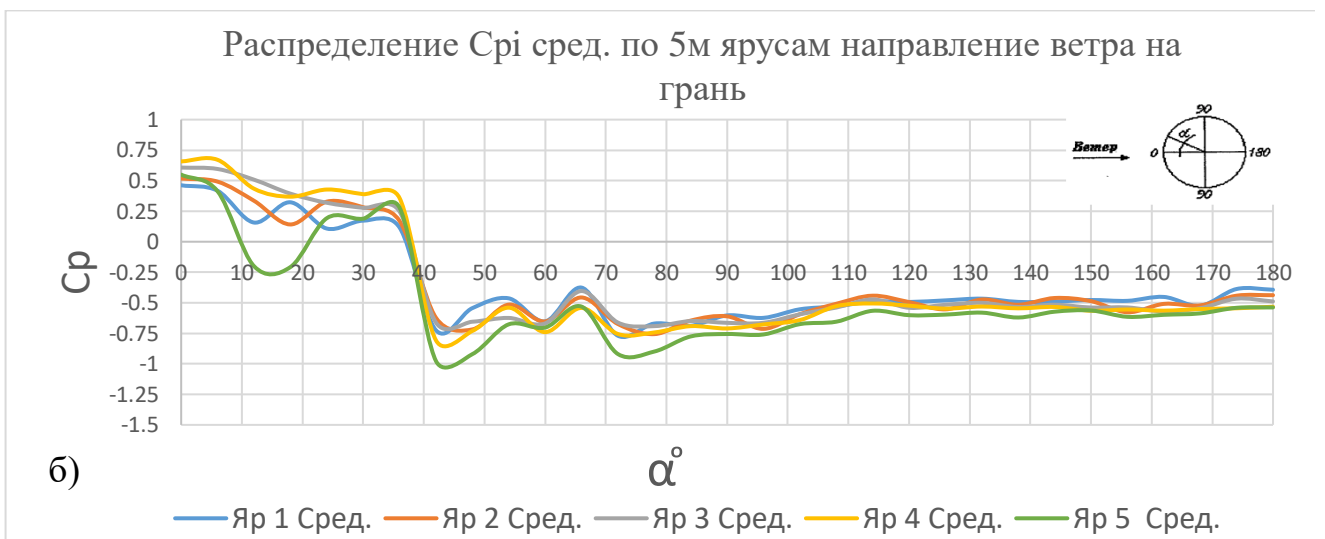
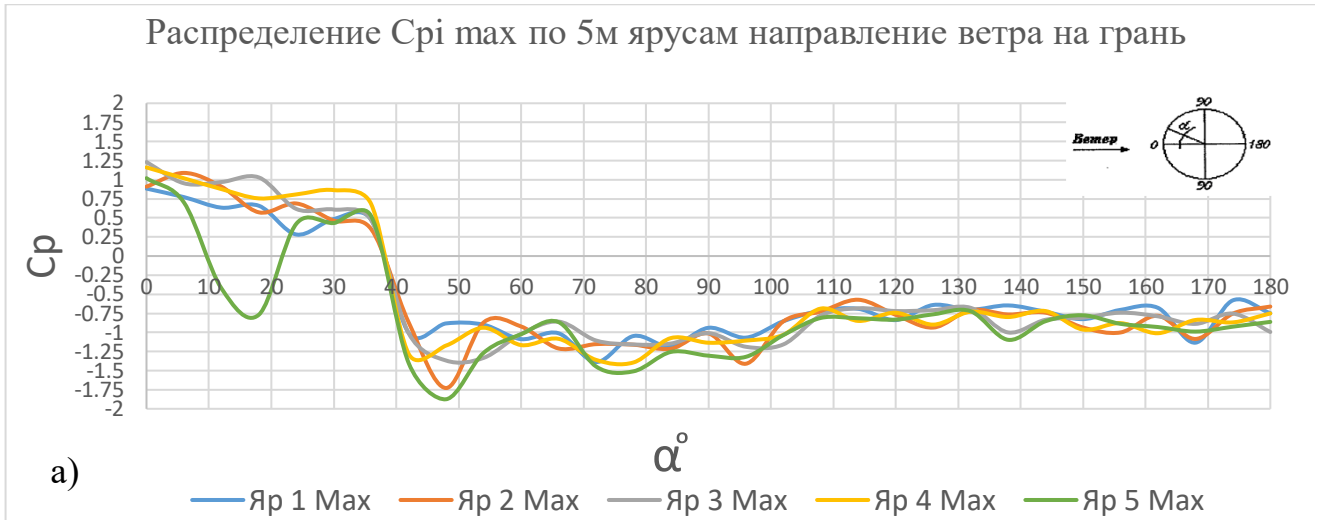
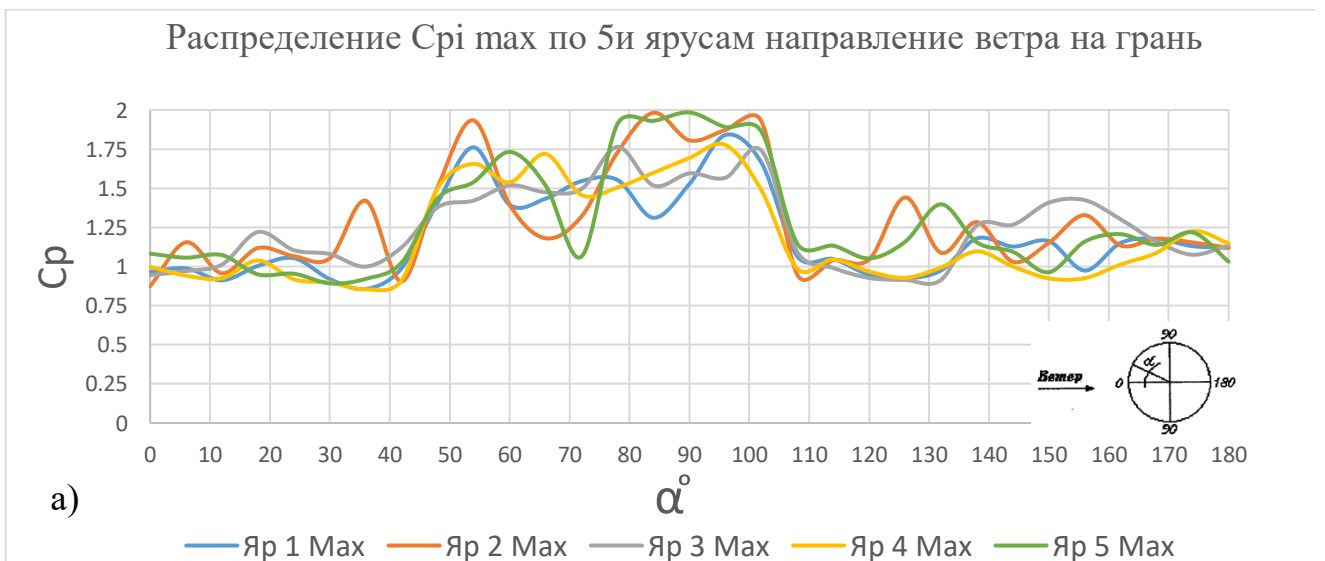


Рисунок В.22 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.



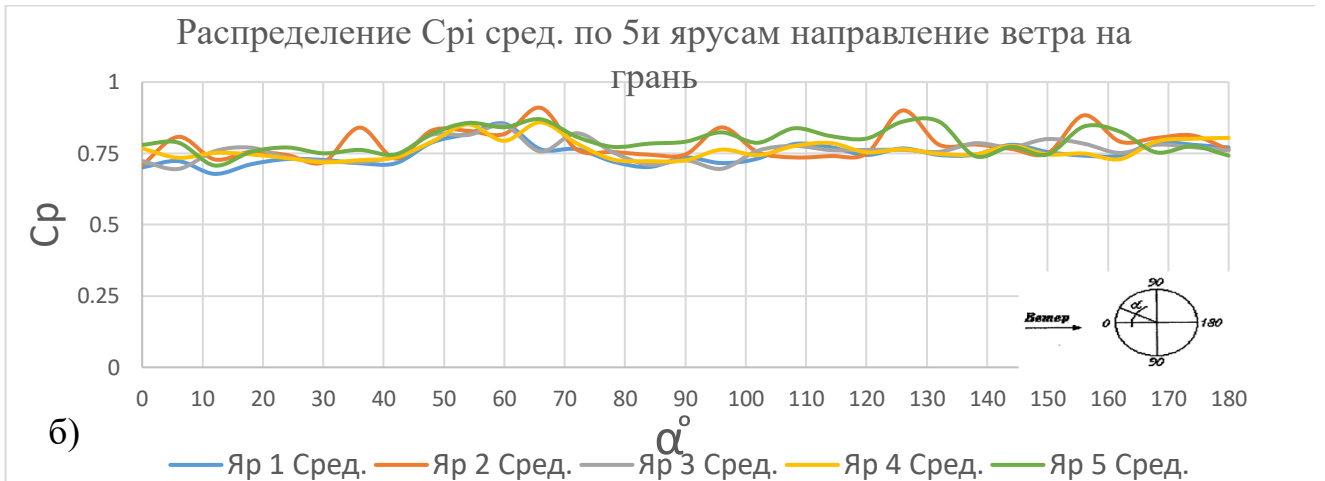


Рисунок В.23 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

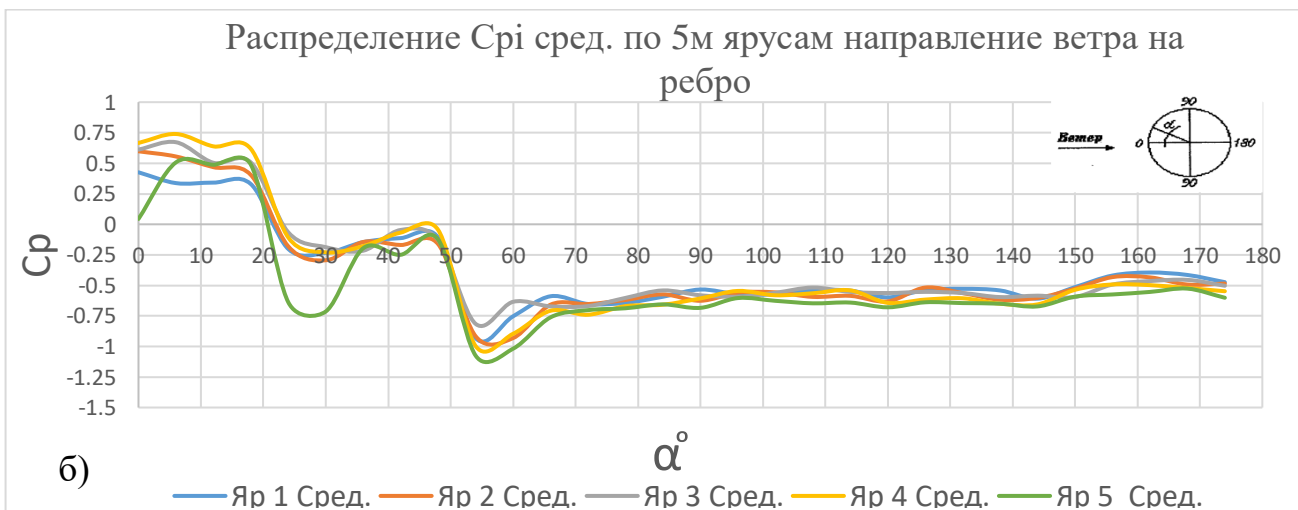
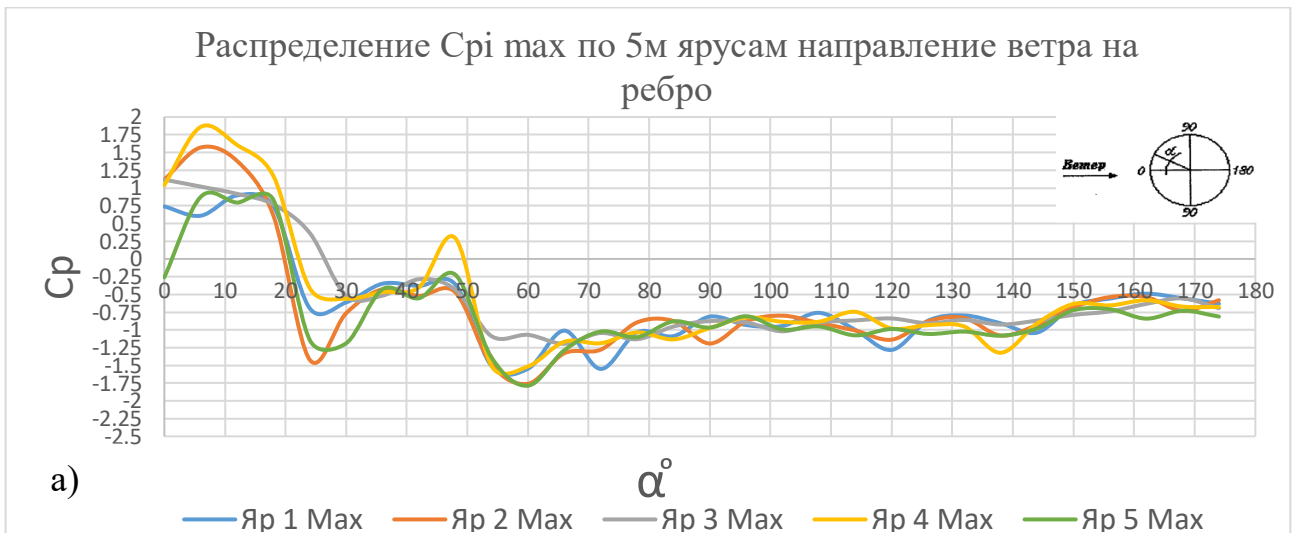


Рисунок В.24 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.

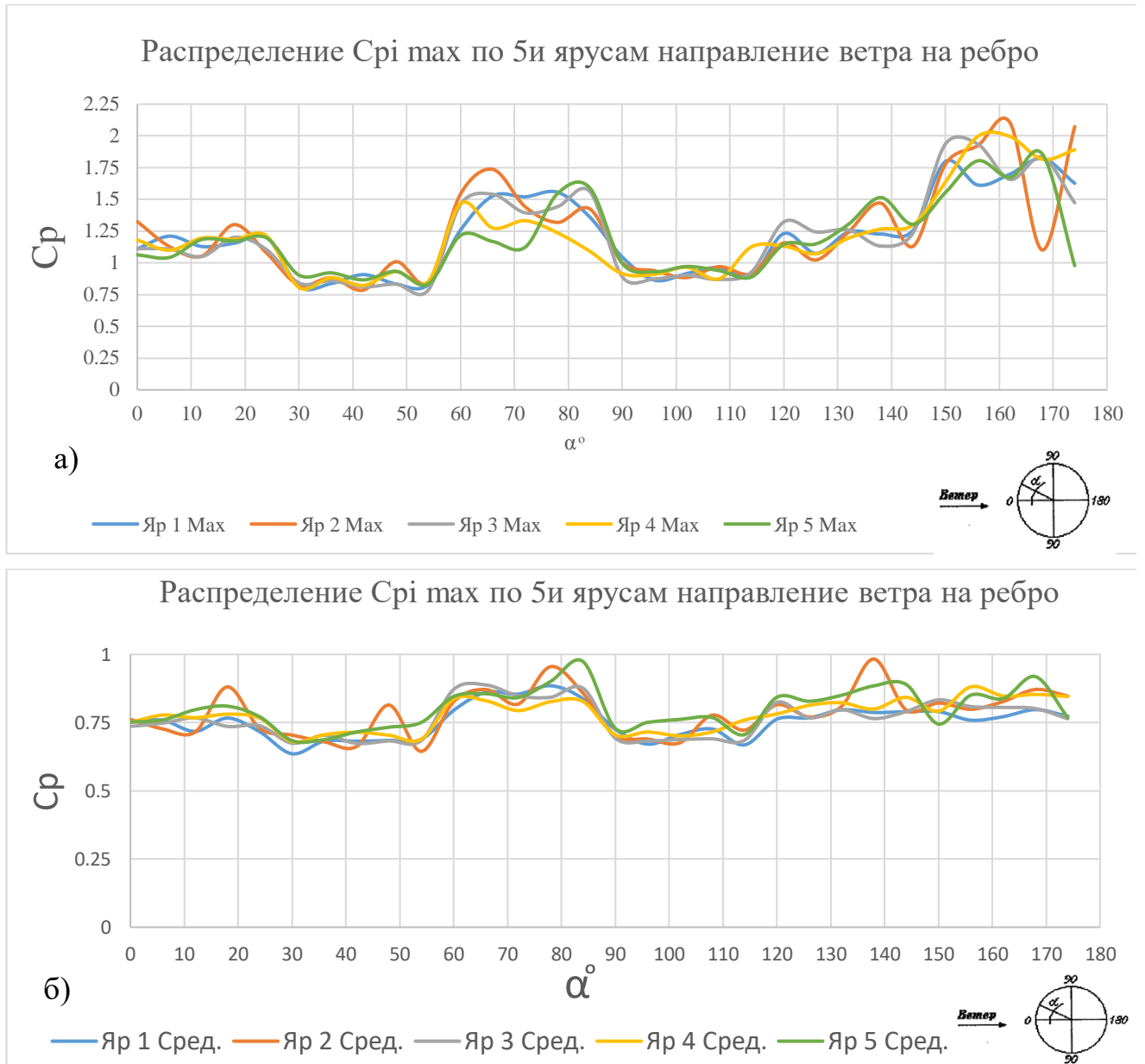


Рисунок В.25 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро.



Рис. 26. Макет башенной металлической двенадцатигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м² расположенный в рабочей части МАТ-1 (монтажная стадия замыкание карт четвертого яруса)

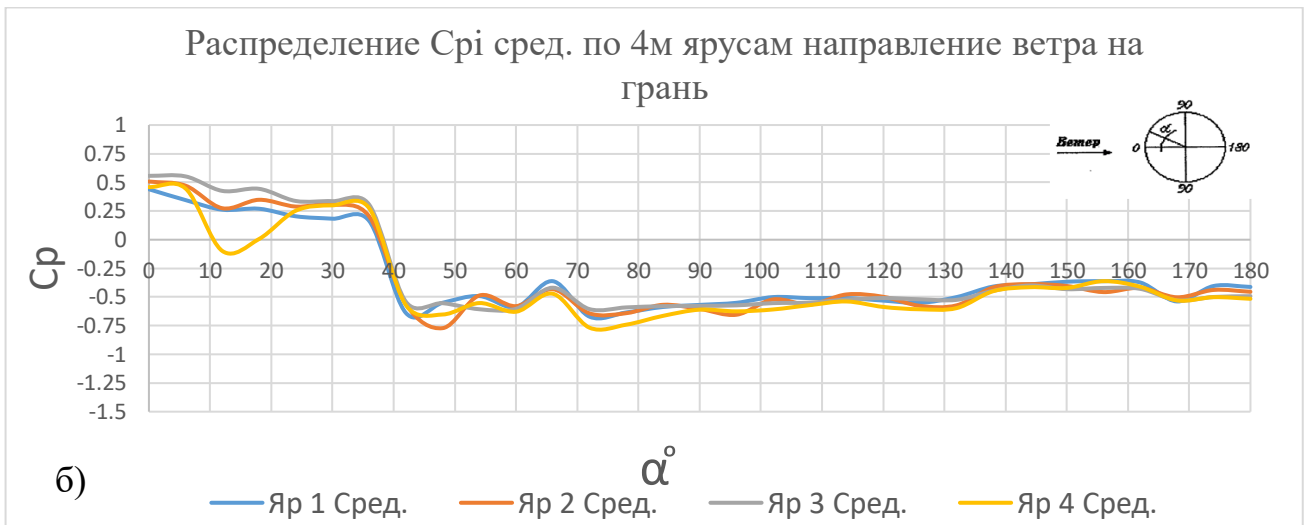
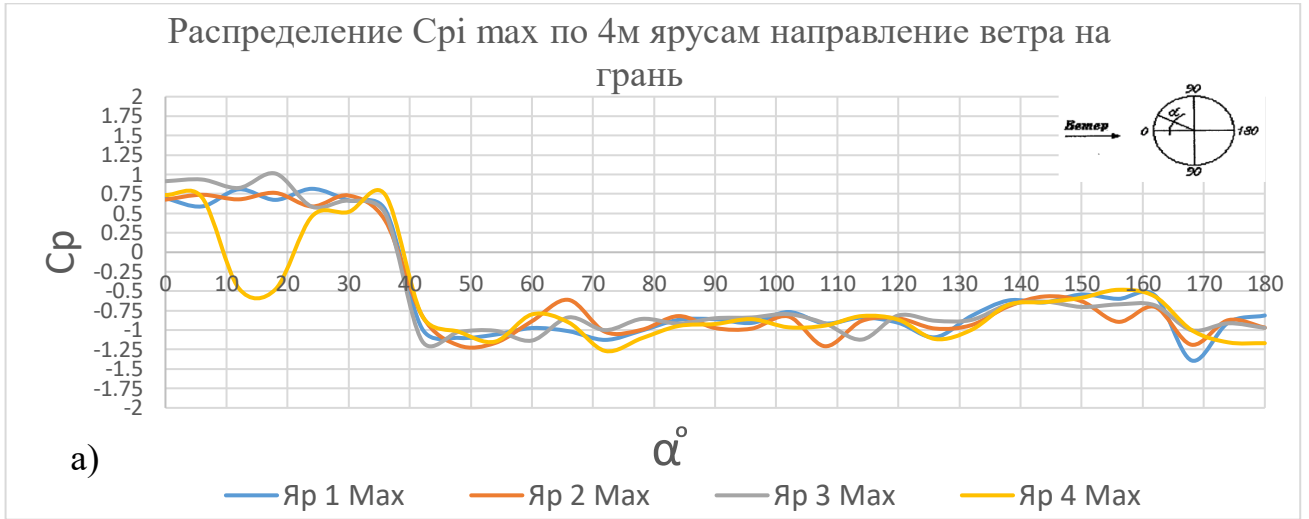
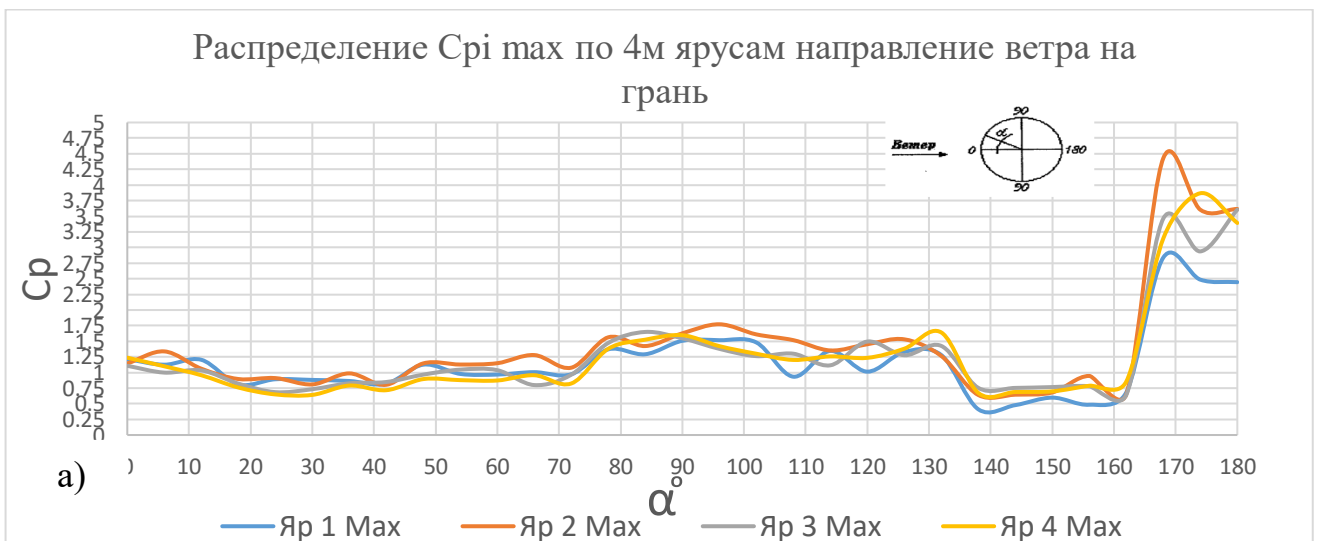


Рисунок В 27 Распределение C_{pi} Монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
- б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.



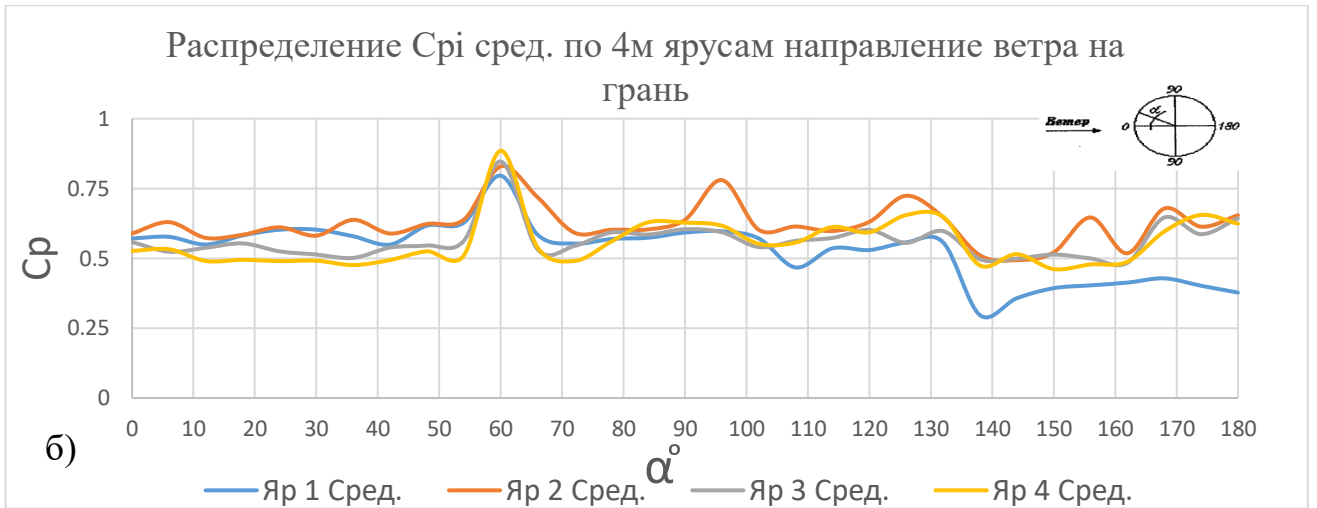


Рисунок В.28 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

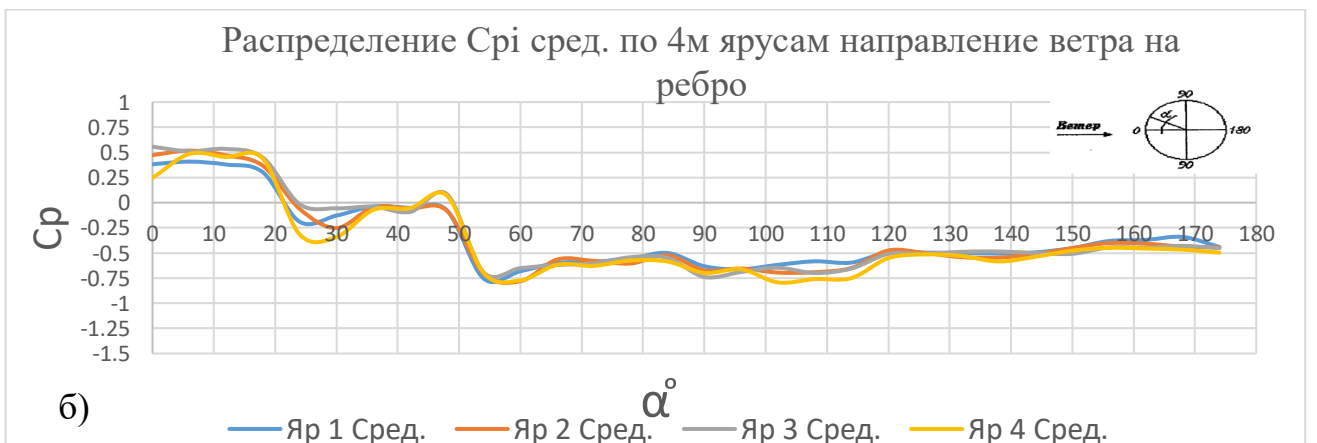


Рисунок В.29 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;

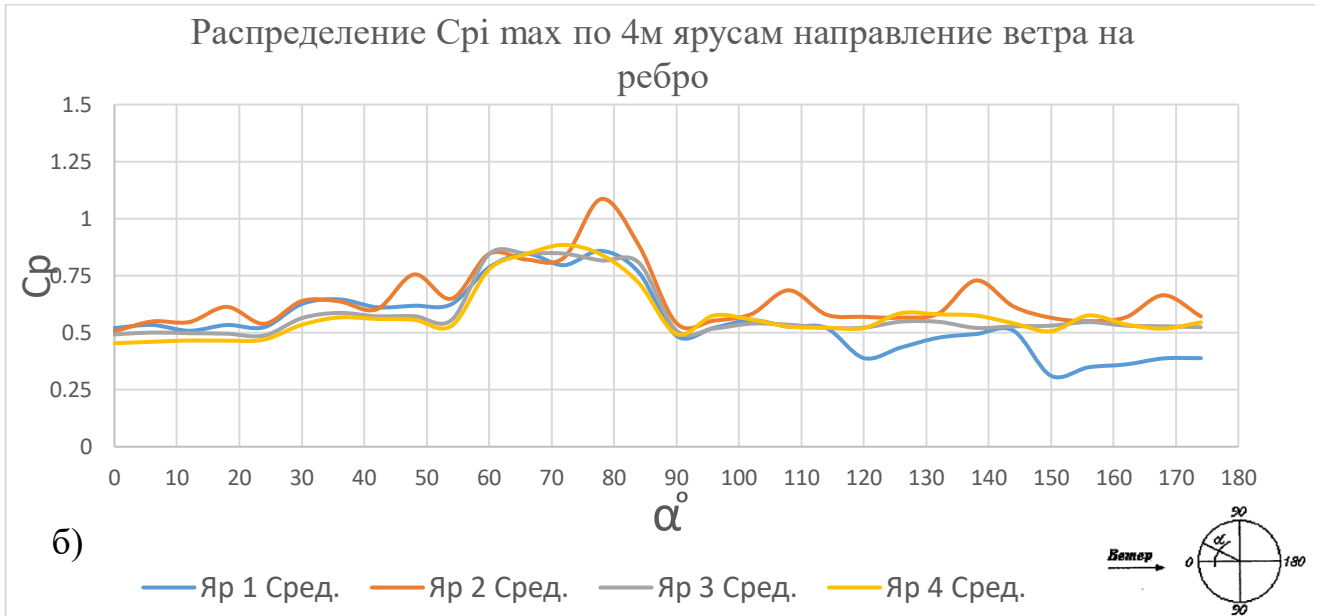
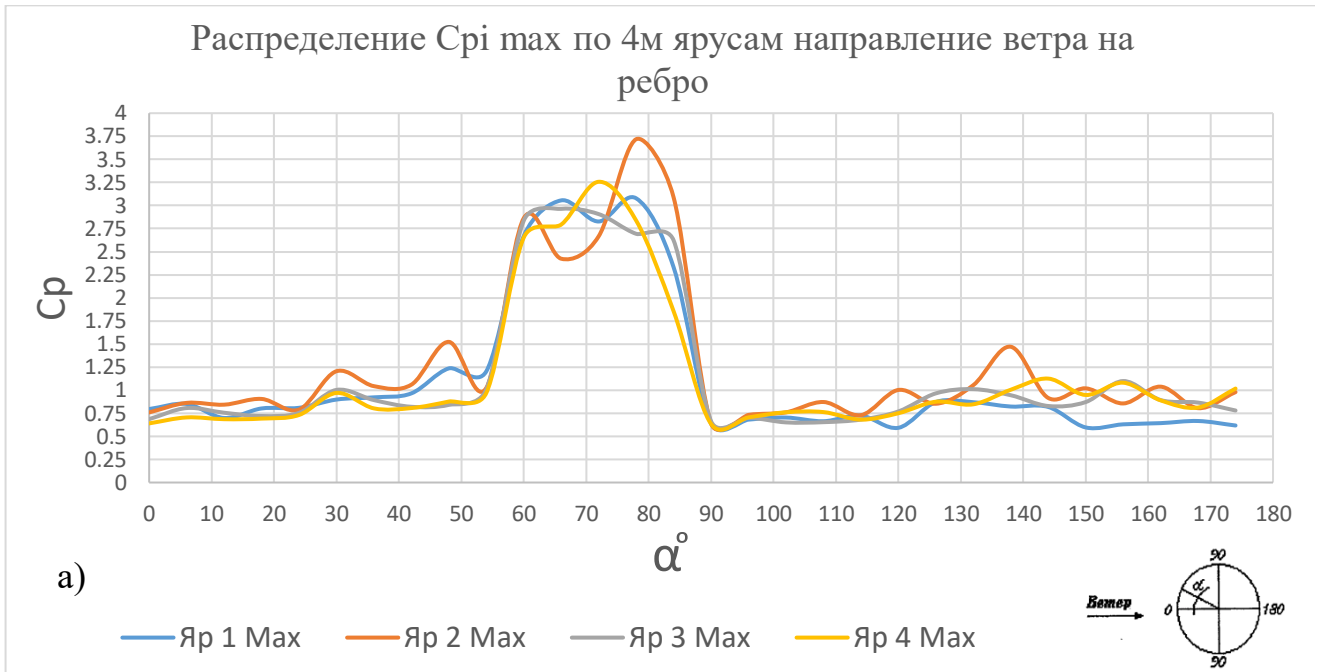


Рисунок В.30 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;

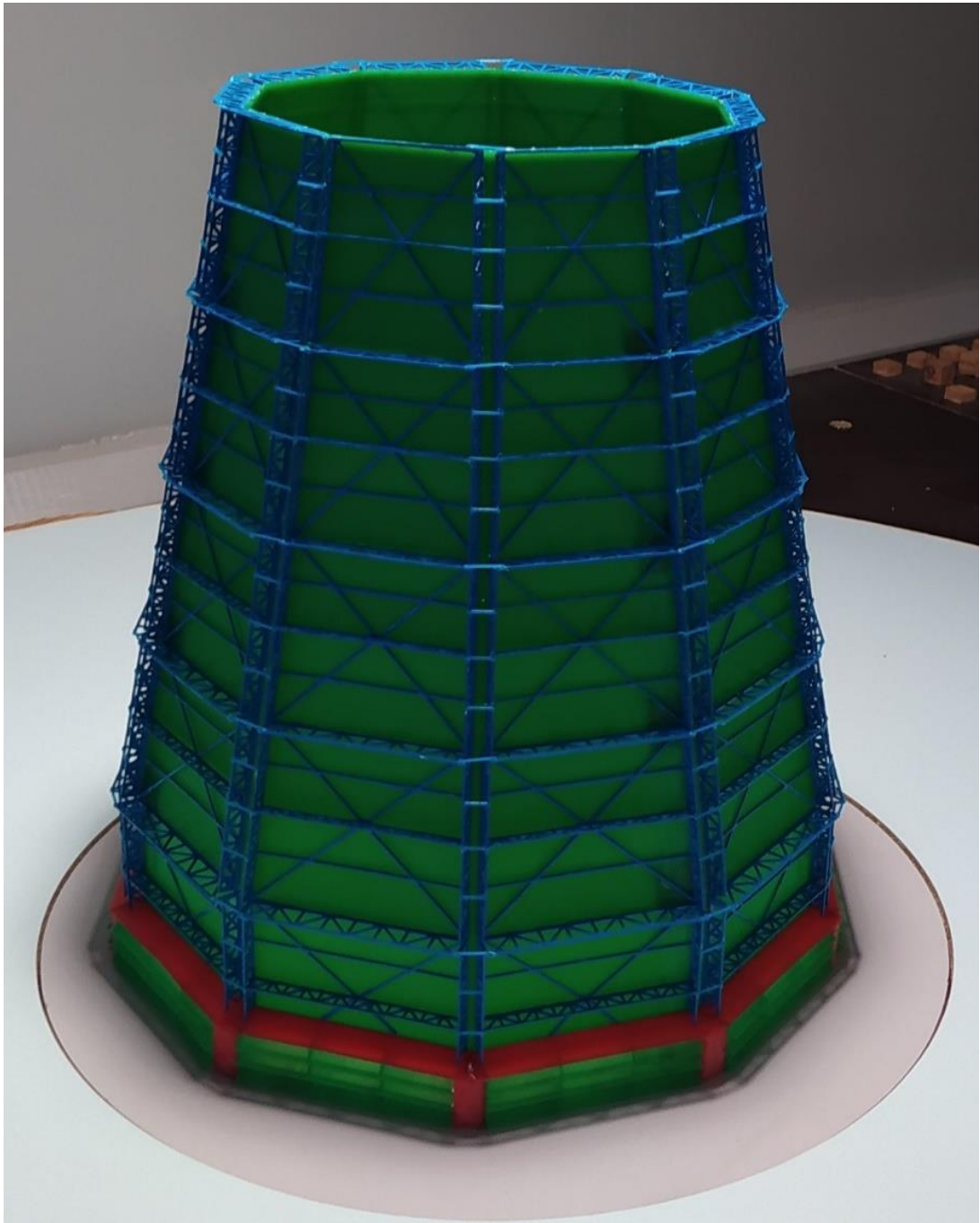


Рисунок В.31 Макет башенной металлической десятигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м^2 расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)

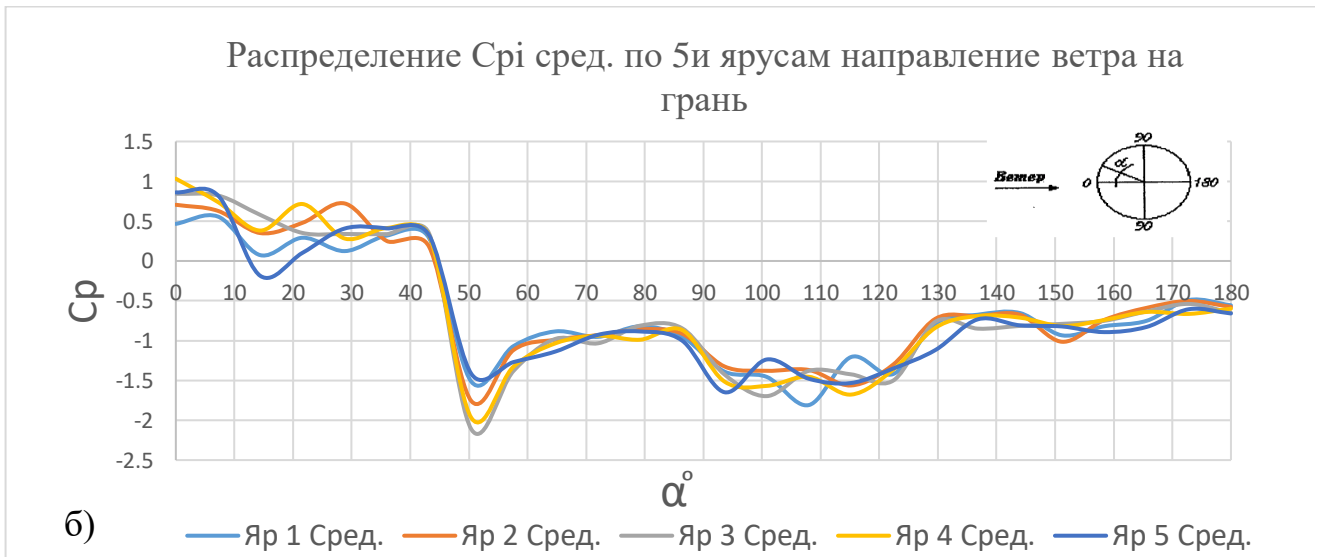
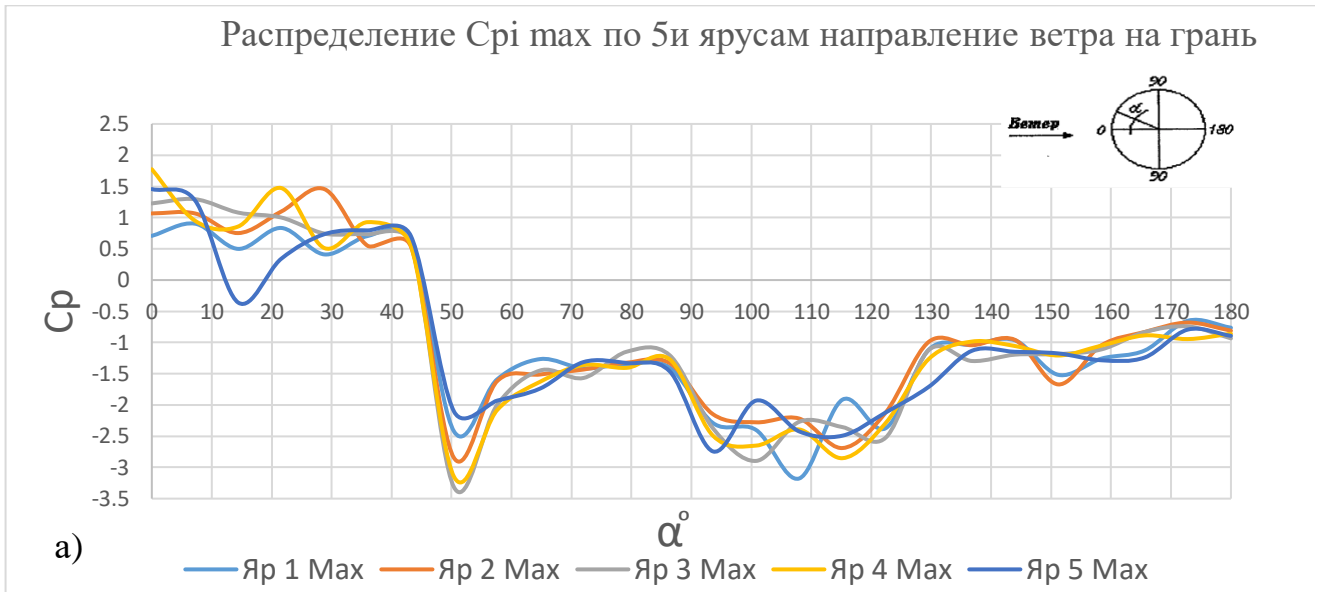
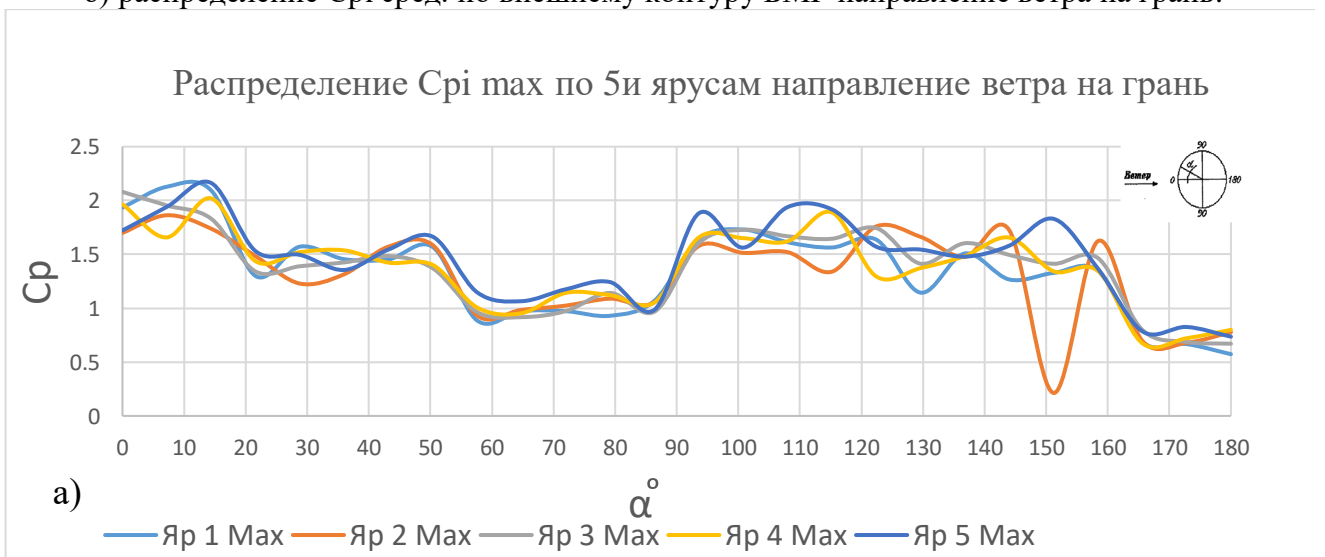


Рисунок В.32 Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.



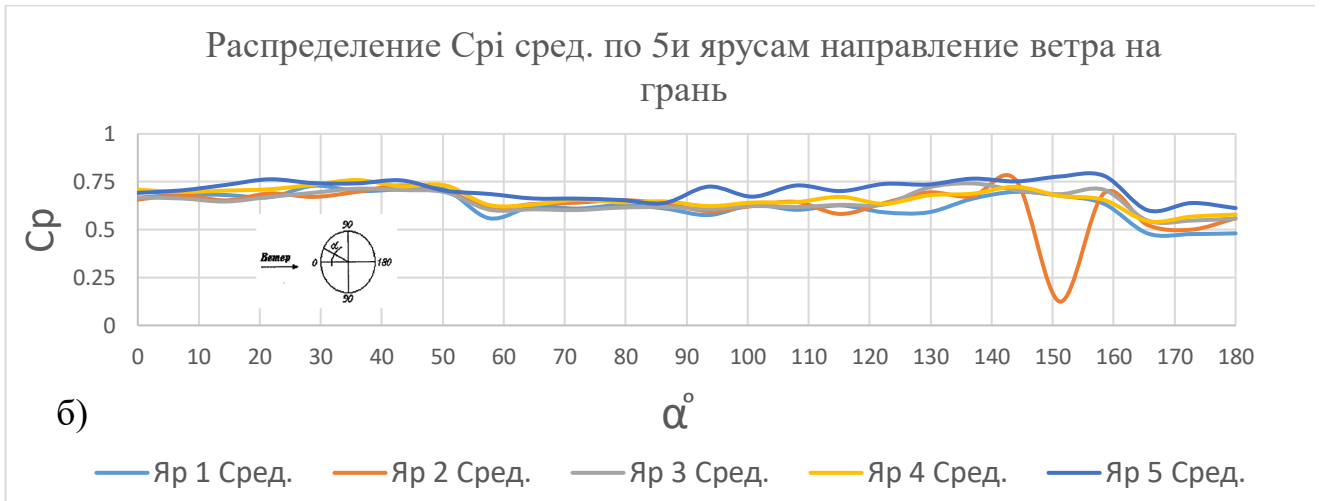


Рисунок В.33 Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

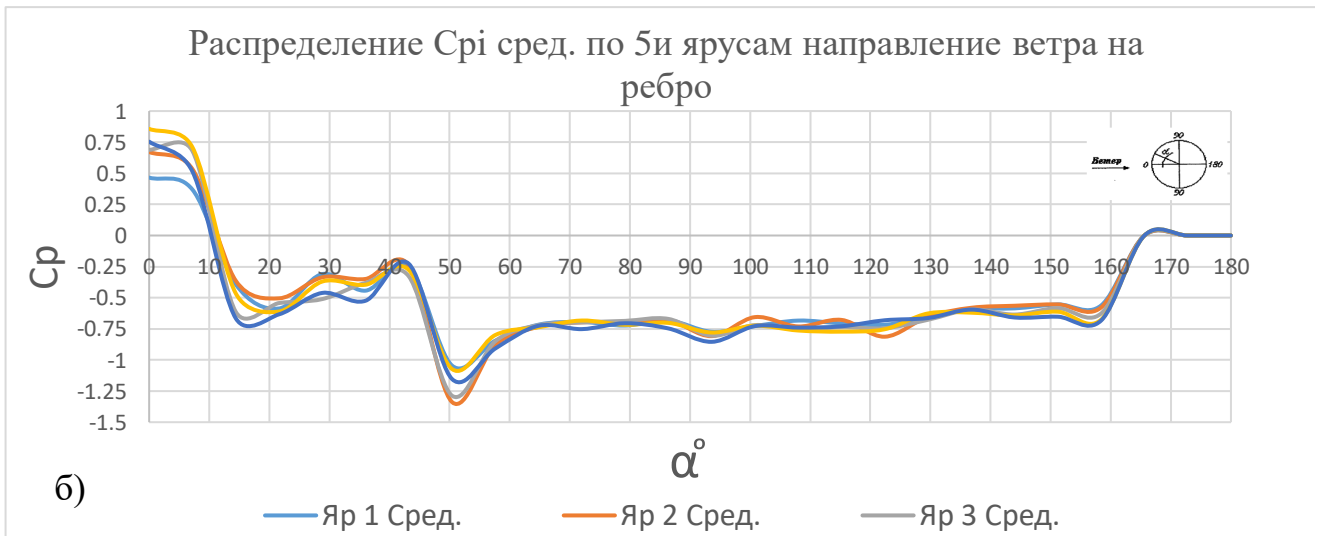
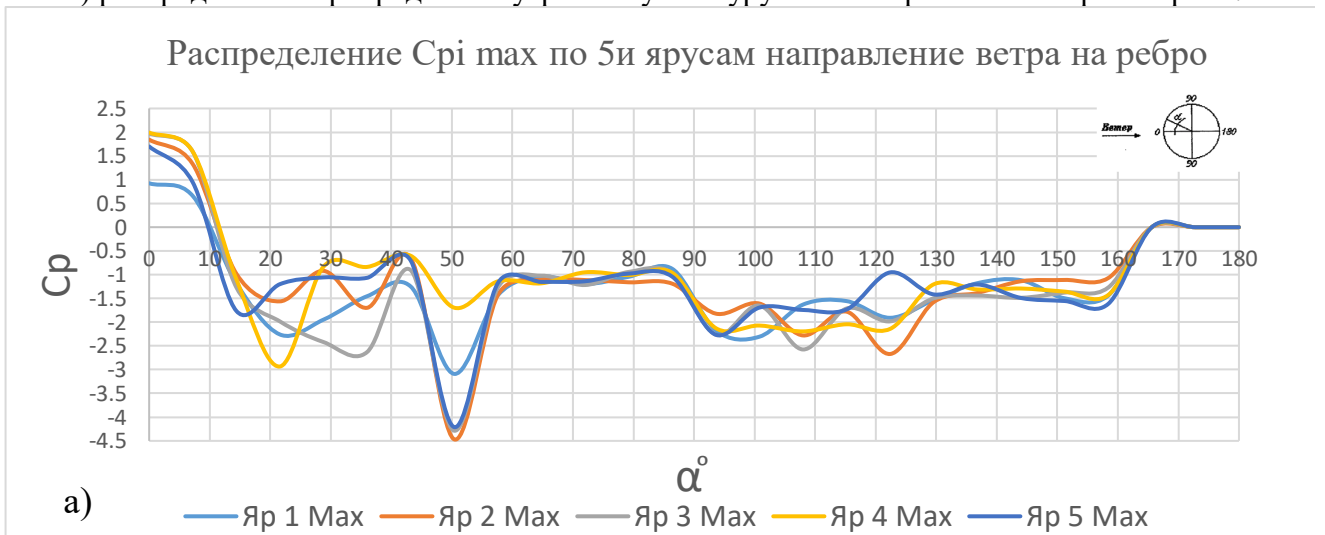


Рисунок В.34. Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.

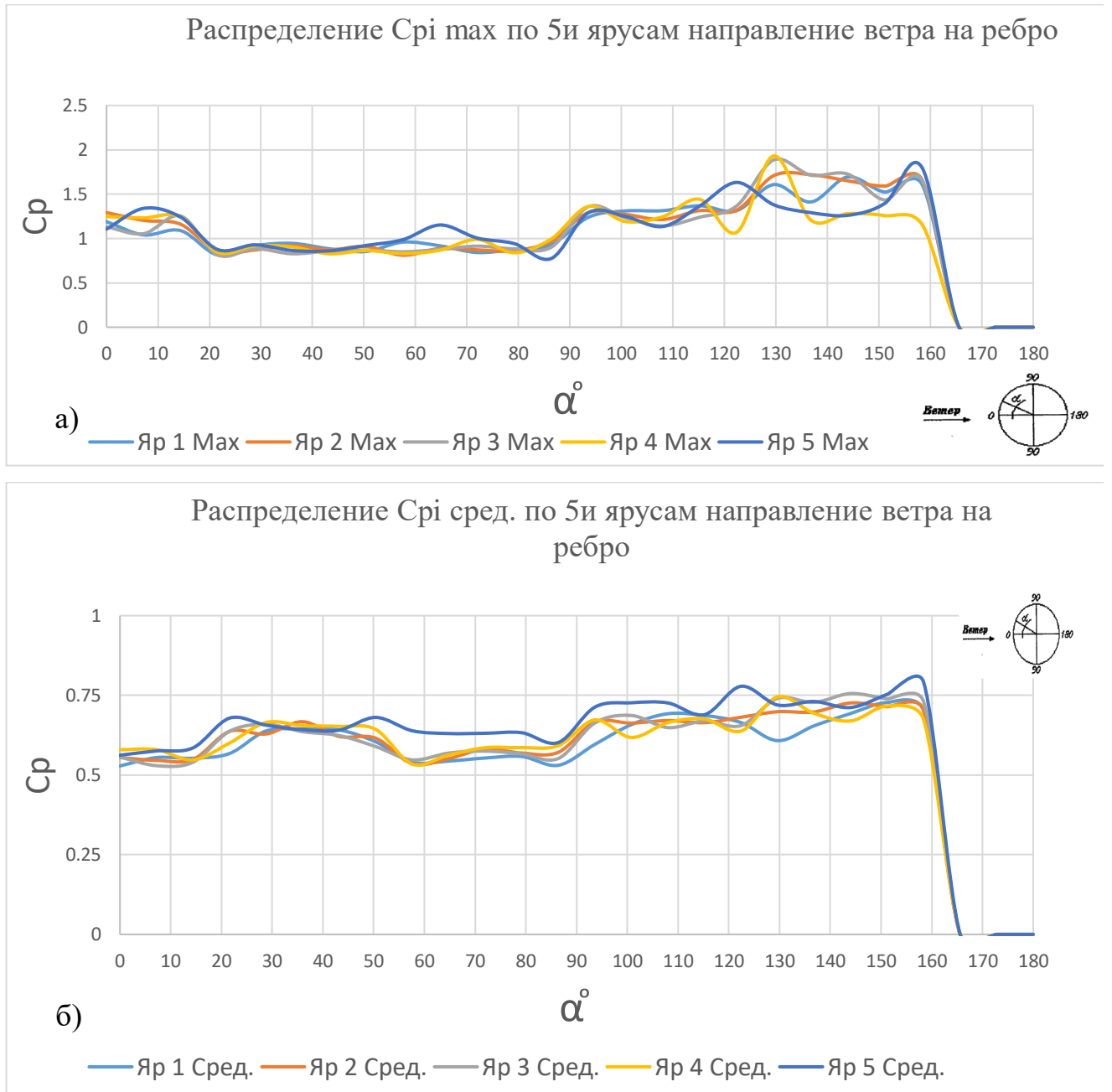


Рисунок В.35 Распределение C_{pi} в летний период эксплуатации.
 а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро.

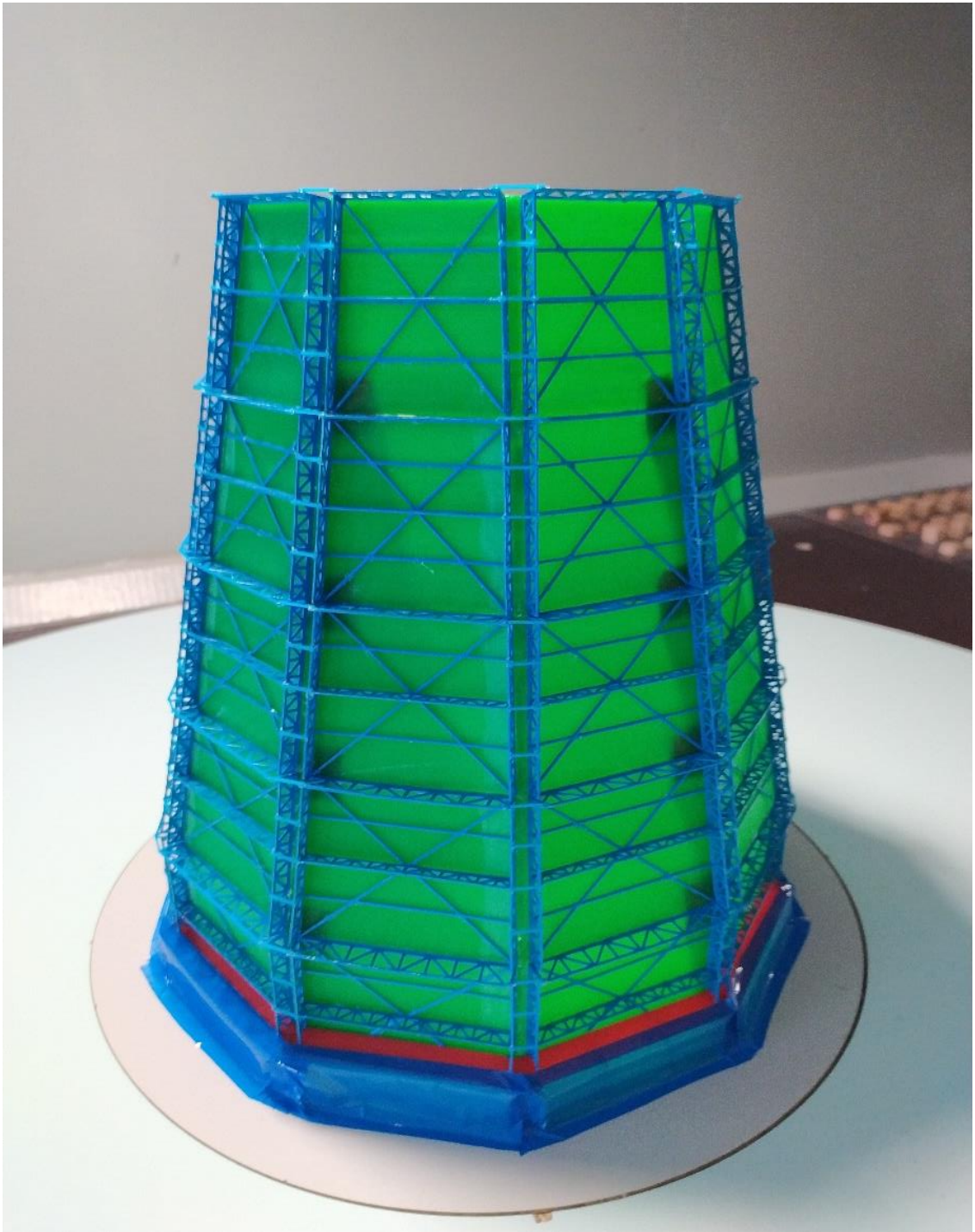


Рисунок В.36 Макет башенной металлической десятигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600m^2 расположенный в рабочей части МАТ-1 (зимний период эксплуатации)

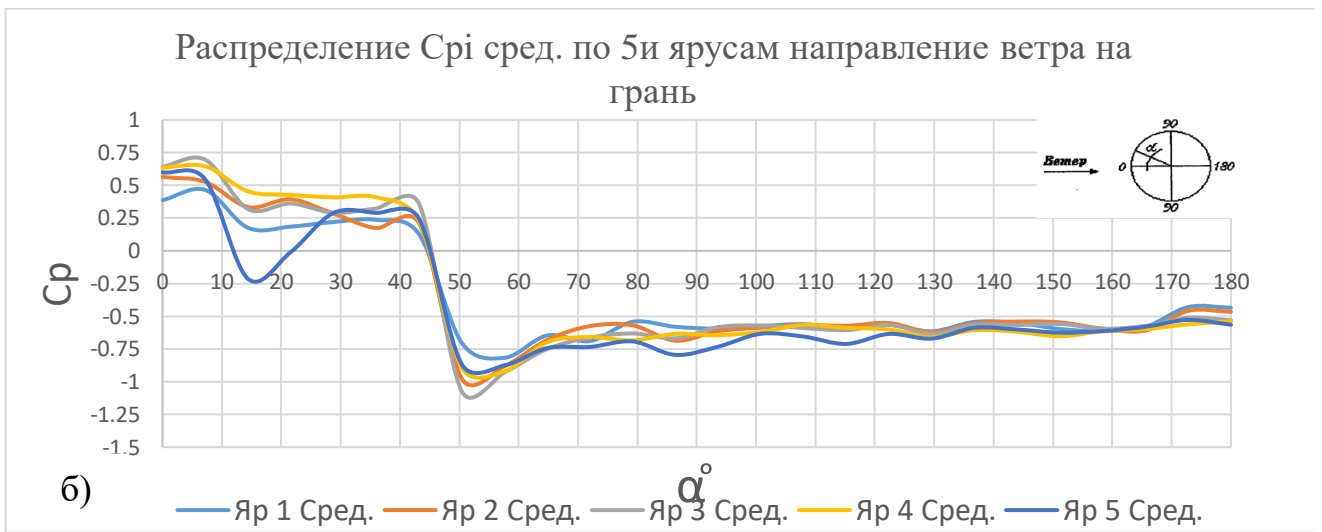
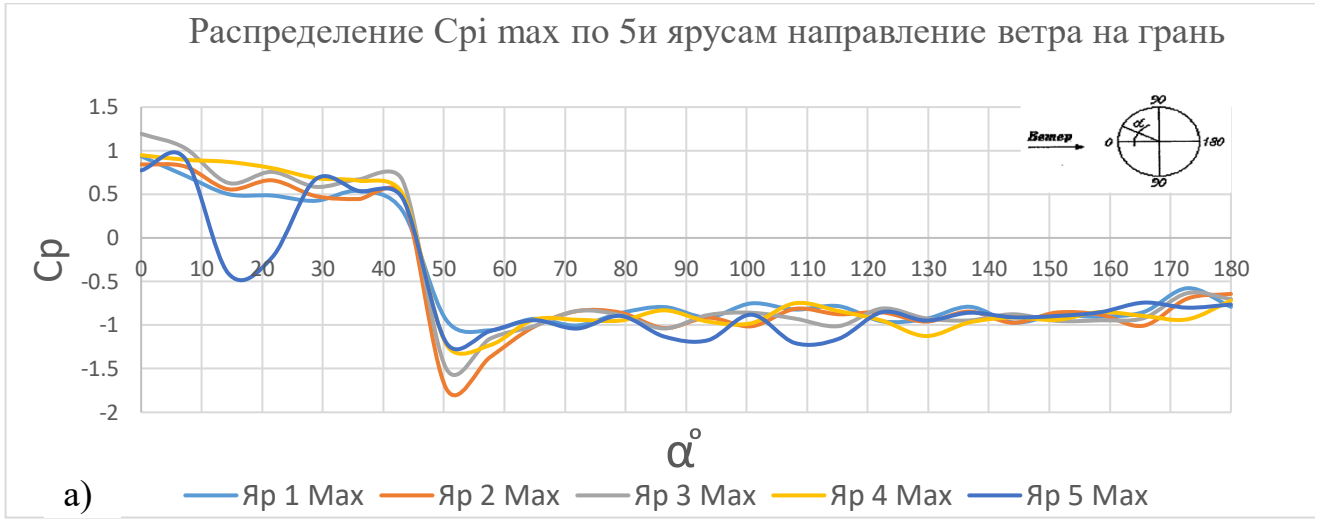
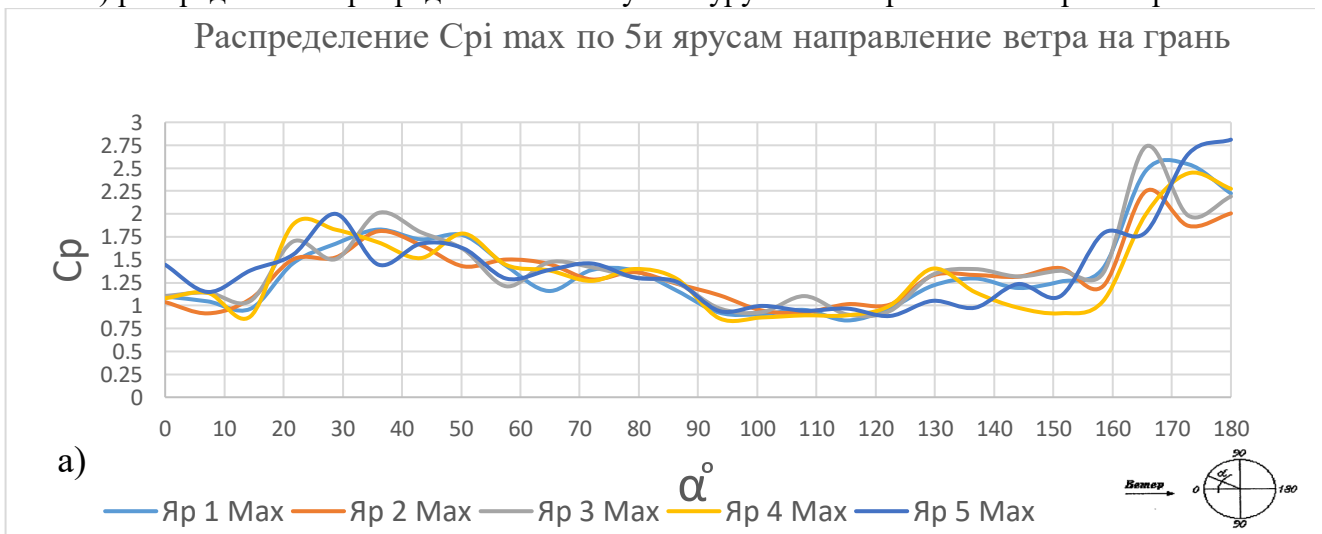


Рисунок В.37 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.
 а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.



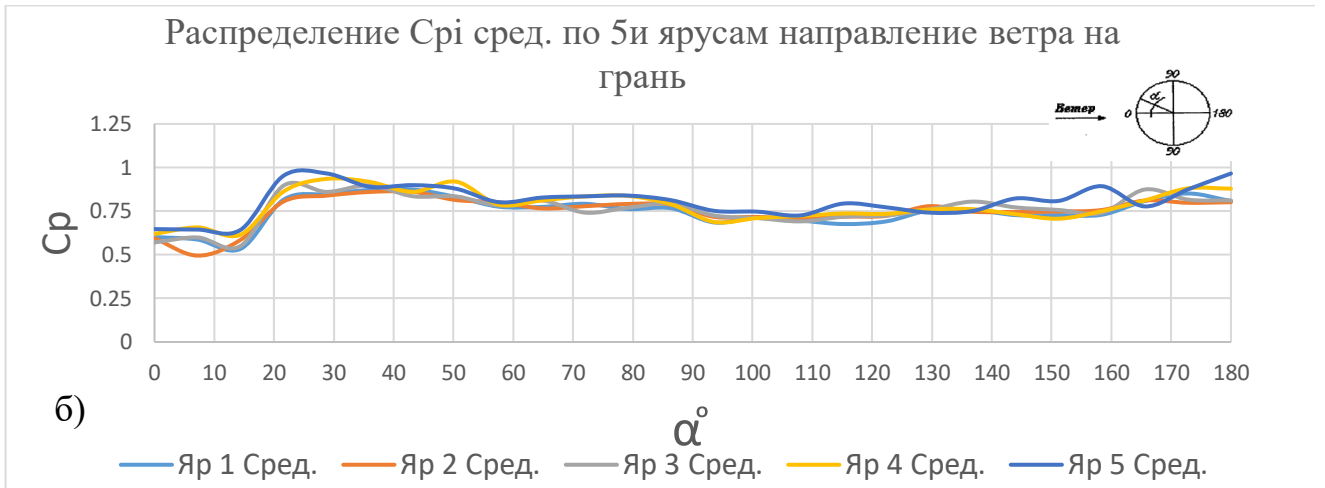


Рисунок В.38 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

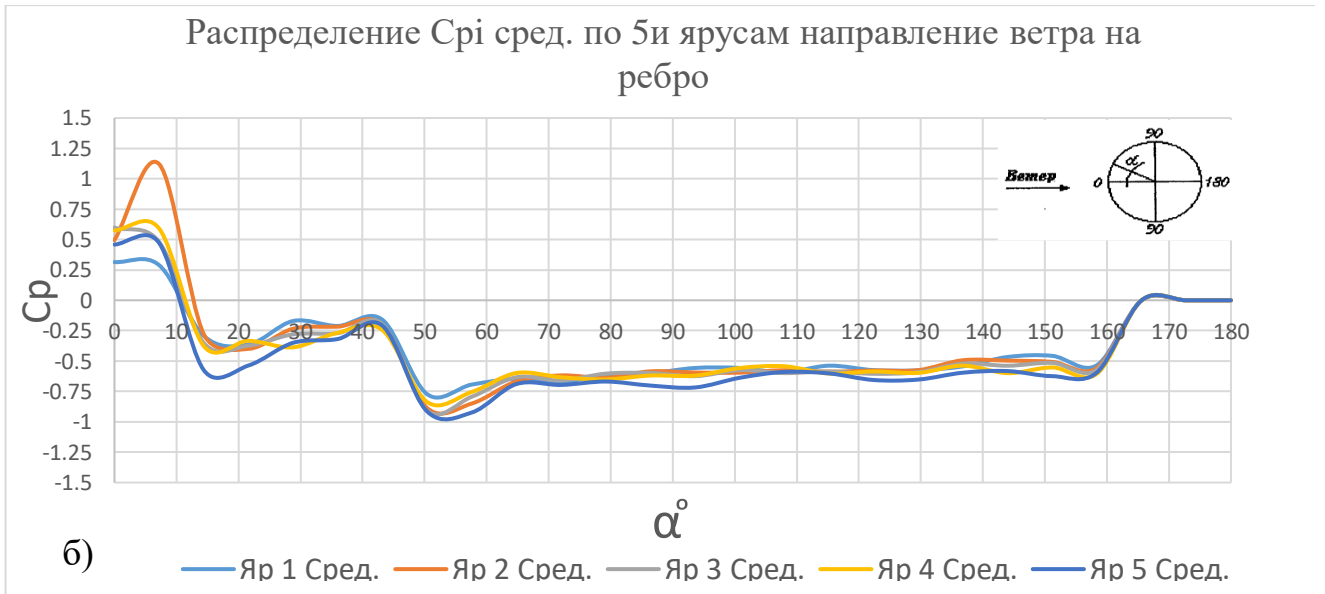
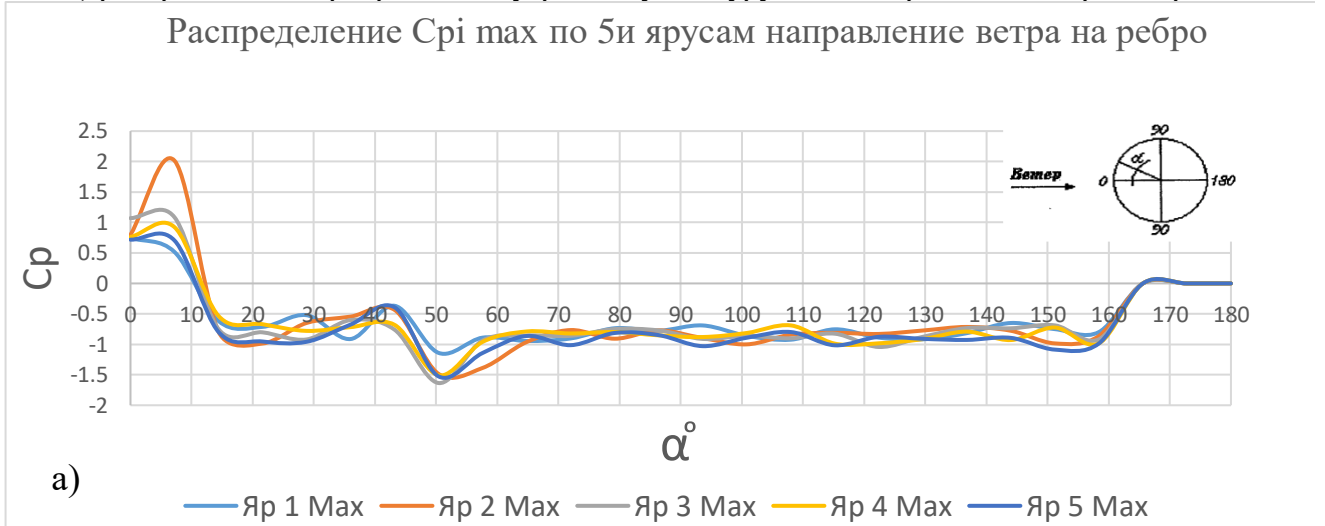


Рисунок В.39 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации:

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.

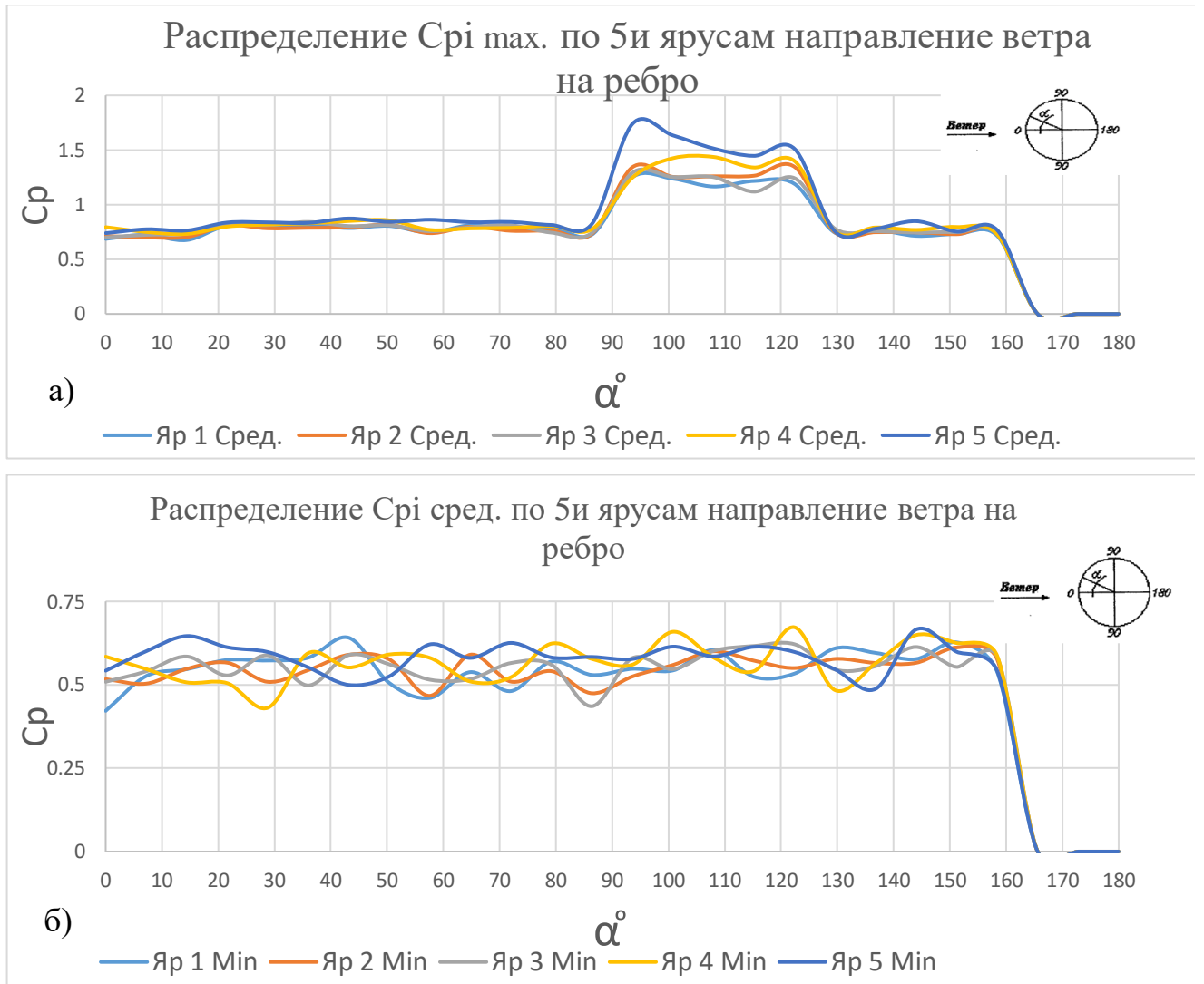


Рисунок В.40 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро.

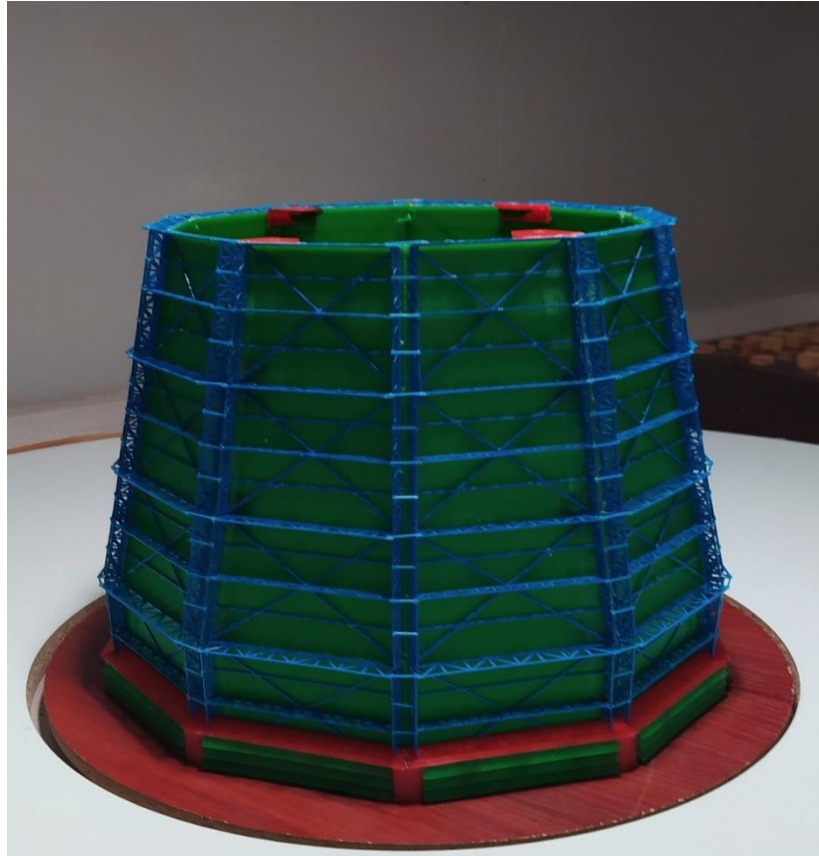
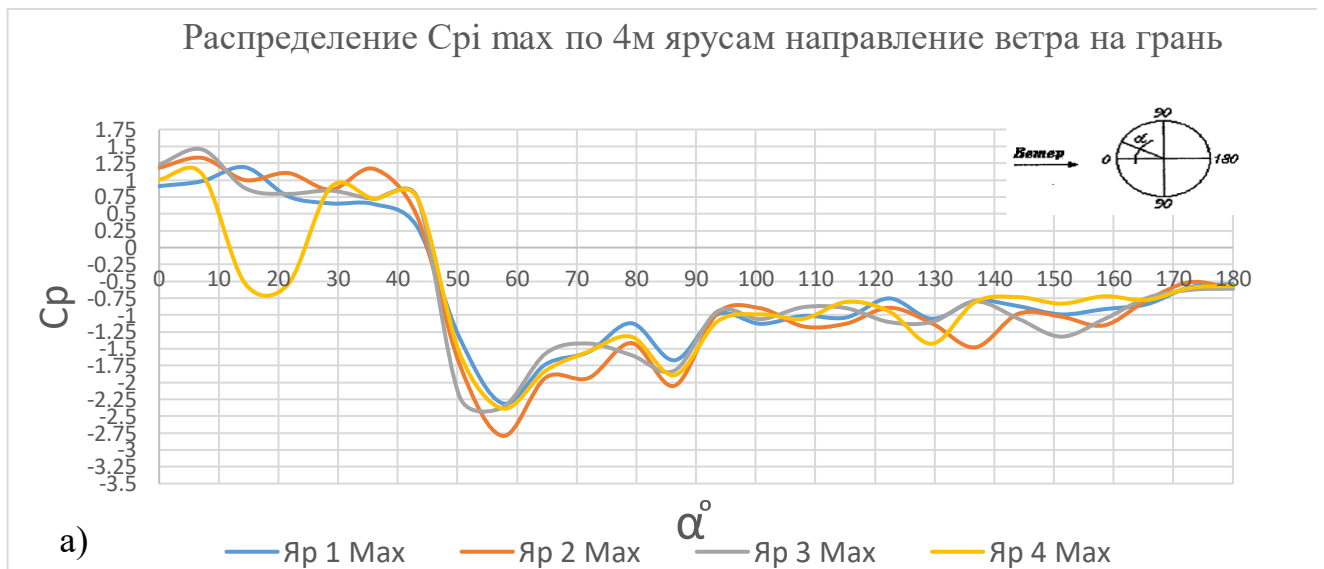


Рисунок В.41 Макет башенной металлической десятигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м^2 расположенный в рабочей части МАТ-1 (монтажная стадия замыкание карт четвертого яруса)



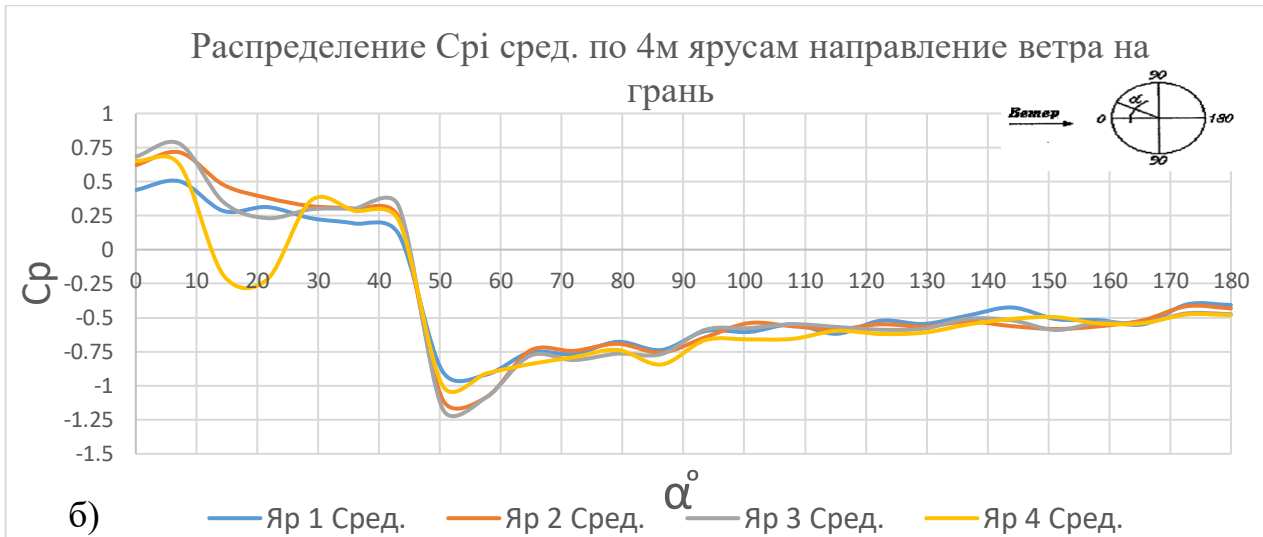


Рисунок В 42 Распределение C_{pi} Монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.

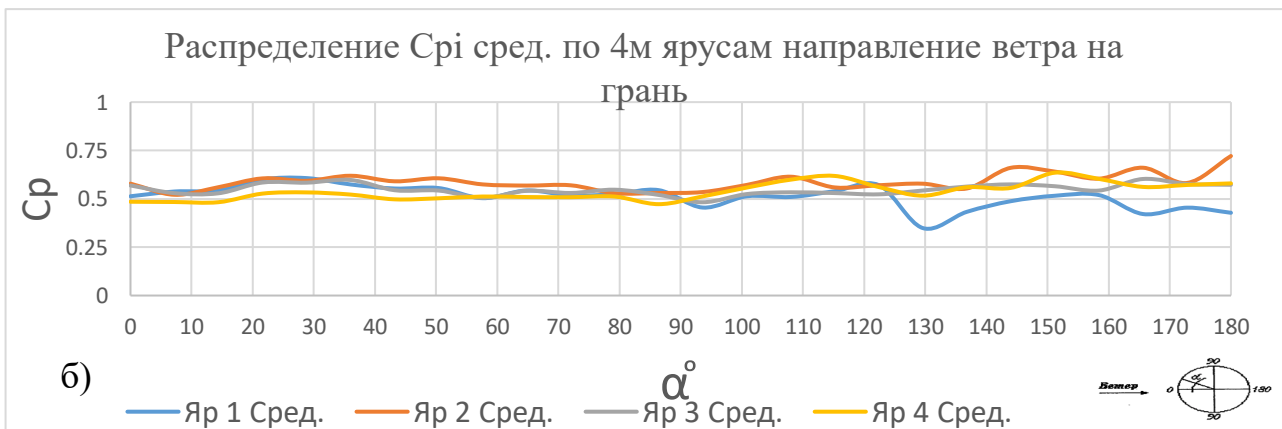


Рисунок В.43 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

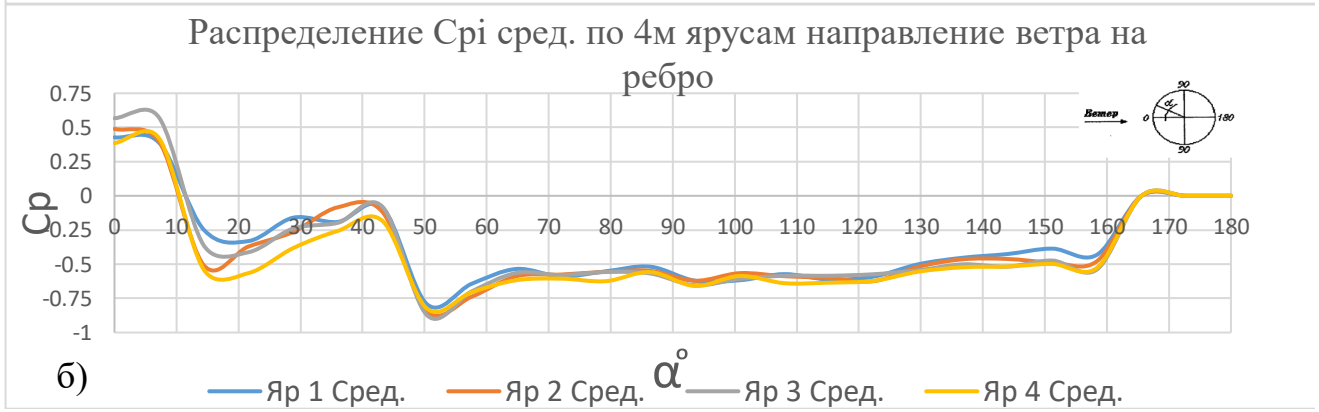
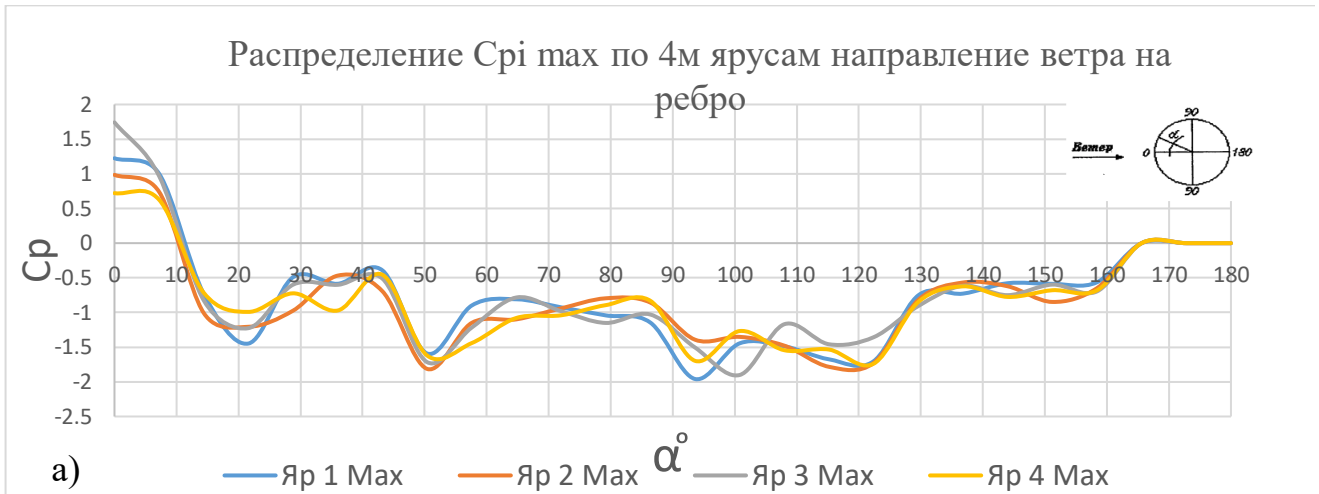
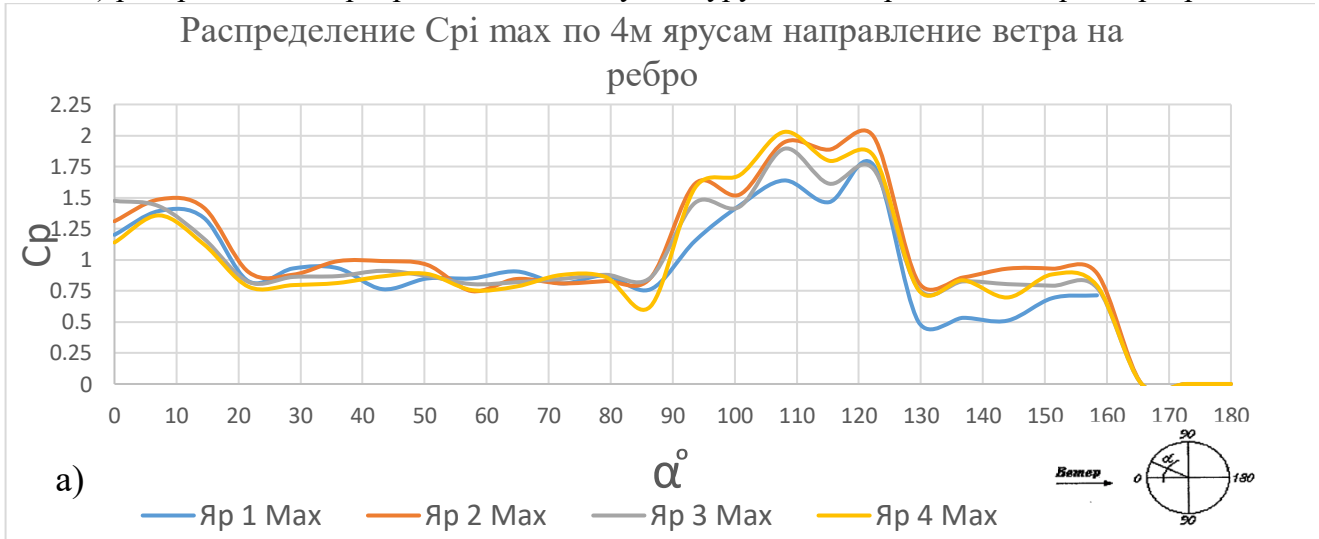


Рисунок В.44 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
- б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;



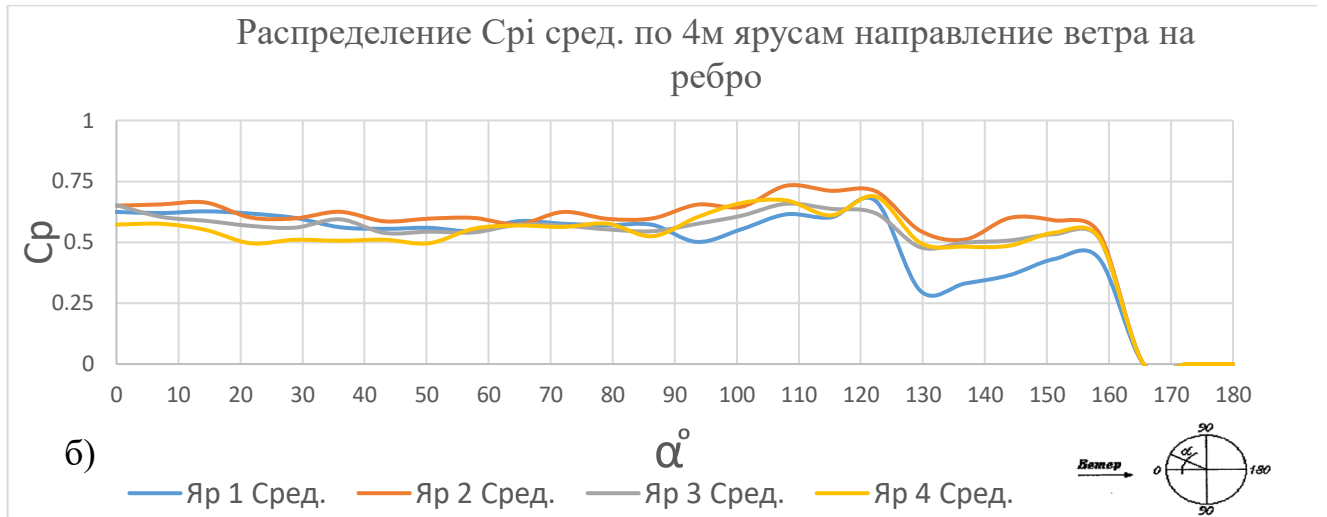


Рисунок В.45 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;

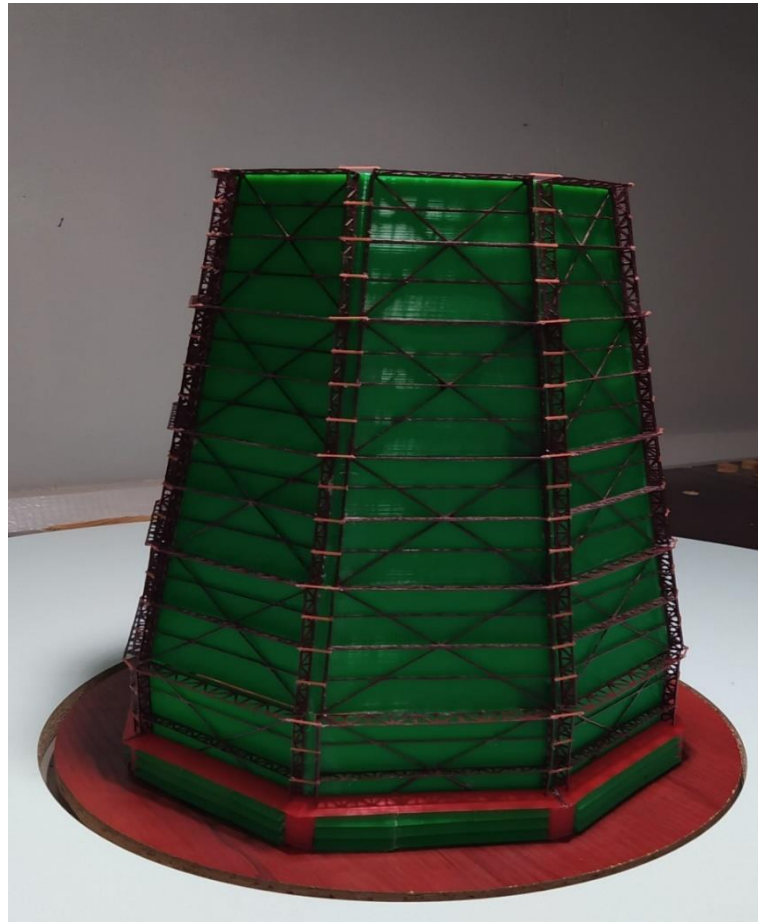


Рисунок В.46 Макет башенной металлической восьмигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600m^2 расположенный в рабочей части МАТ-1(летний период эксплуатации)

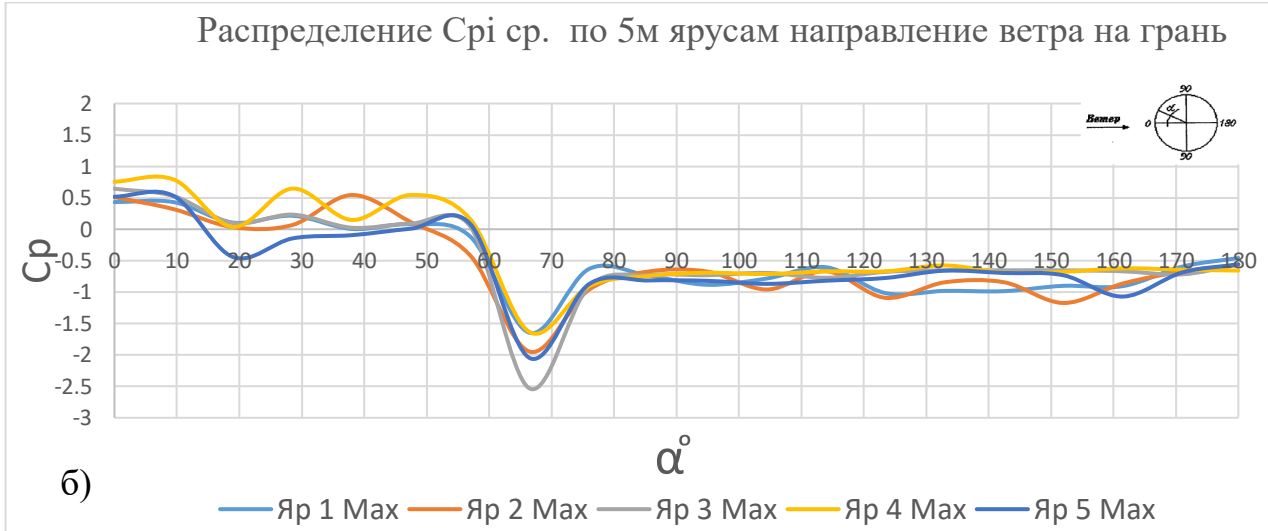
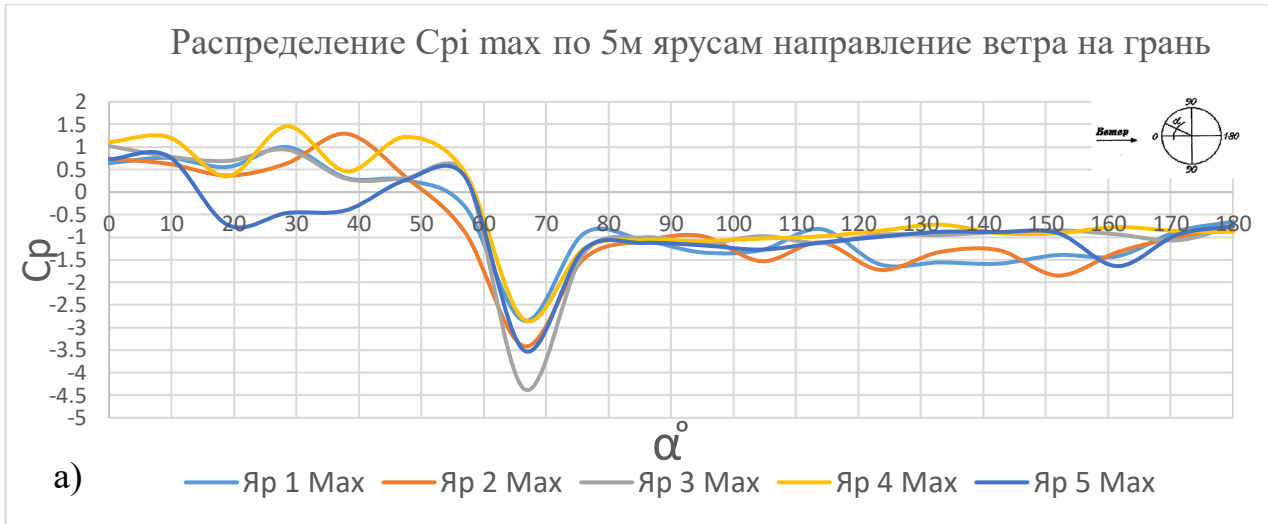
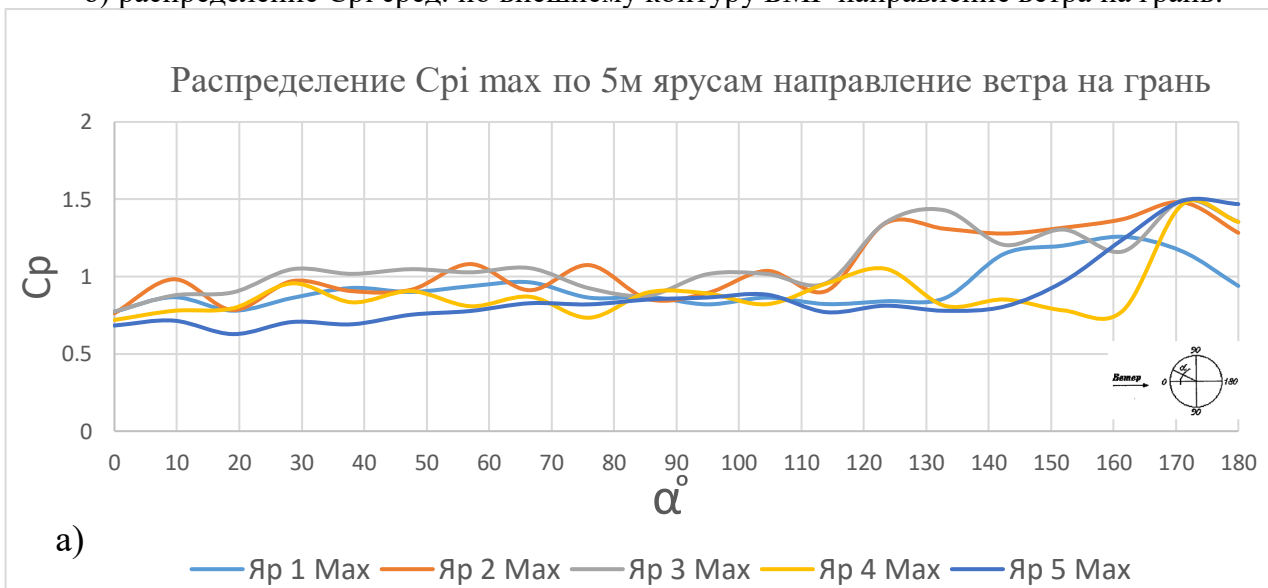


Рисунок В.47 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.



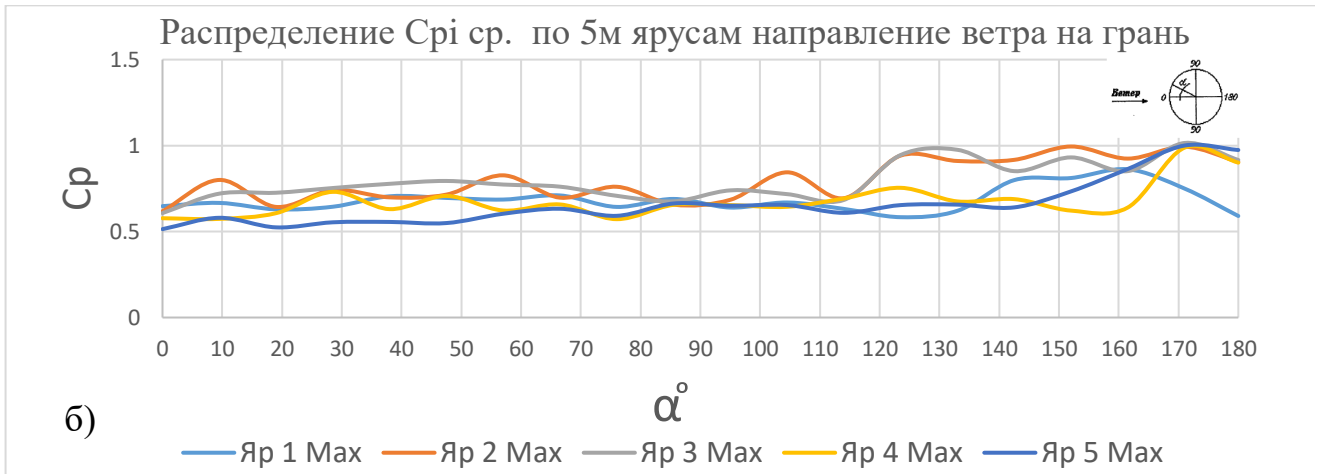


Рисунок В.48 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань; .

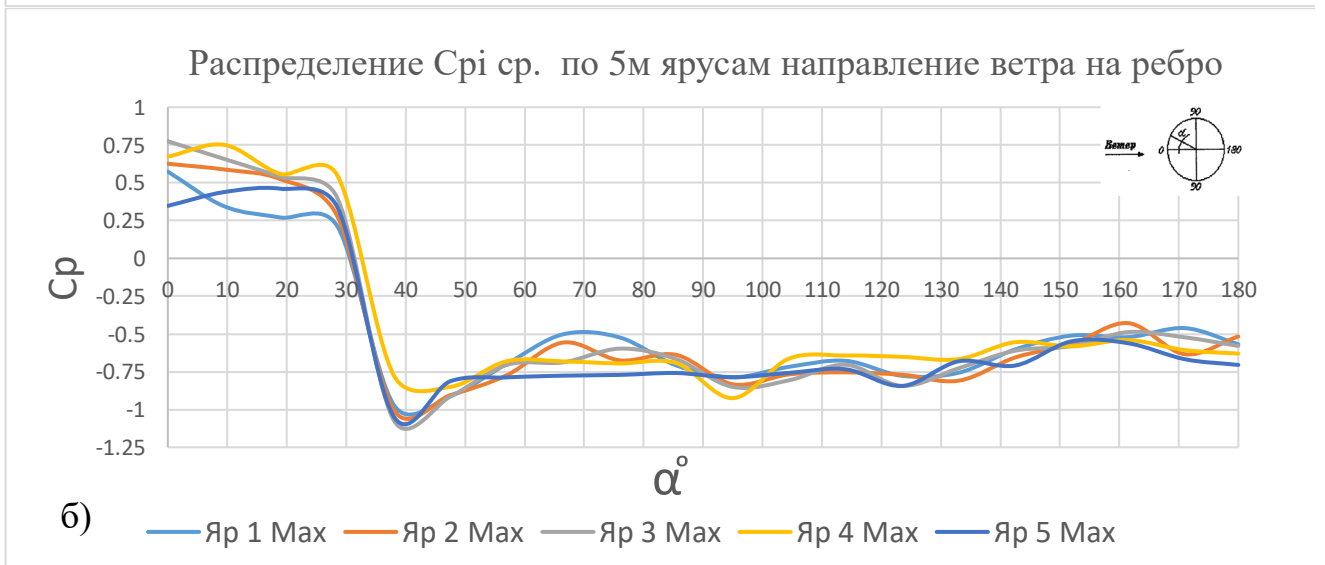
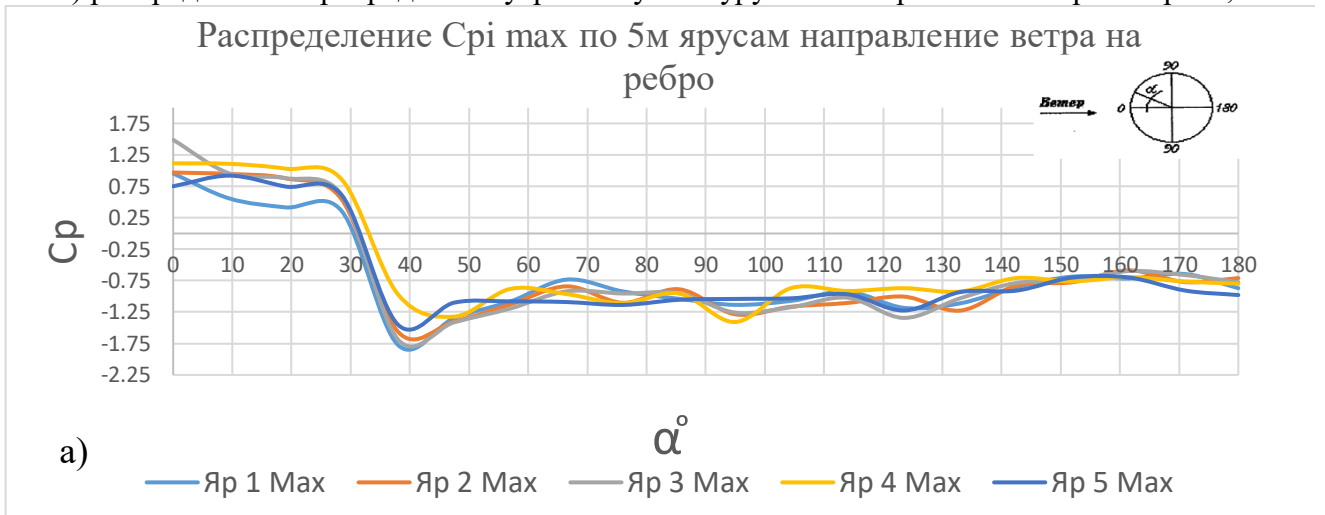


Рисунок В.49 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.

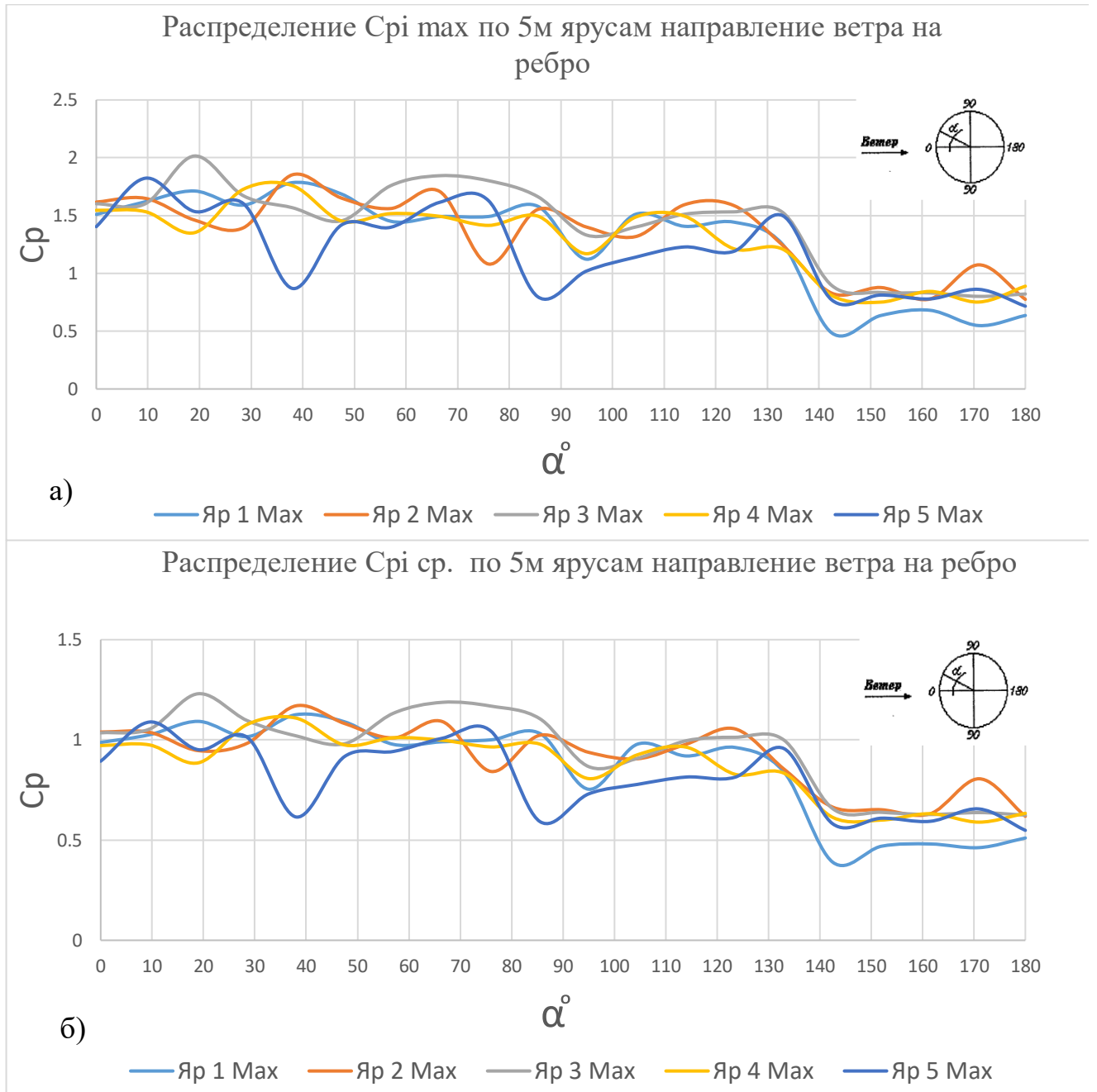


Рисунок В.50 Распределение C_{pi} летний период эксплуатации направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;

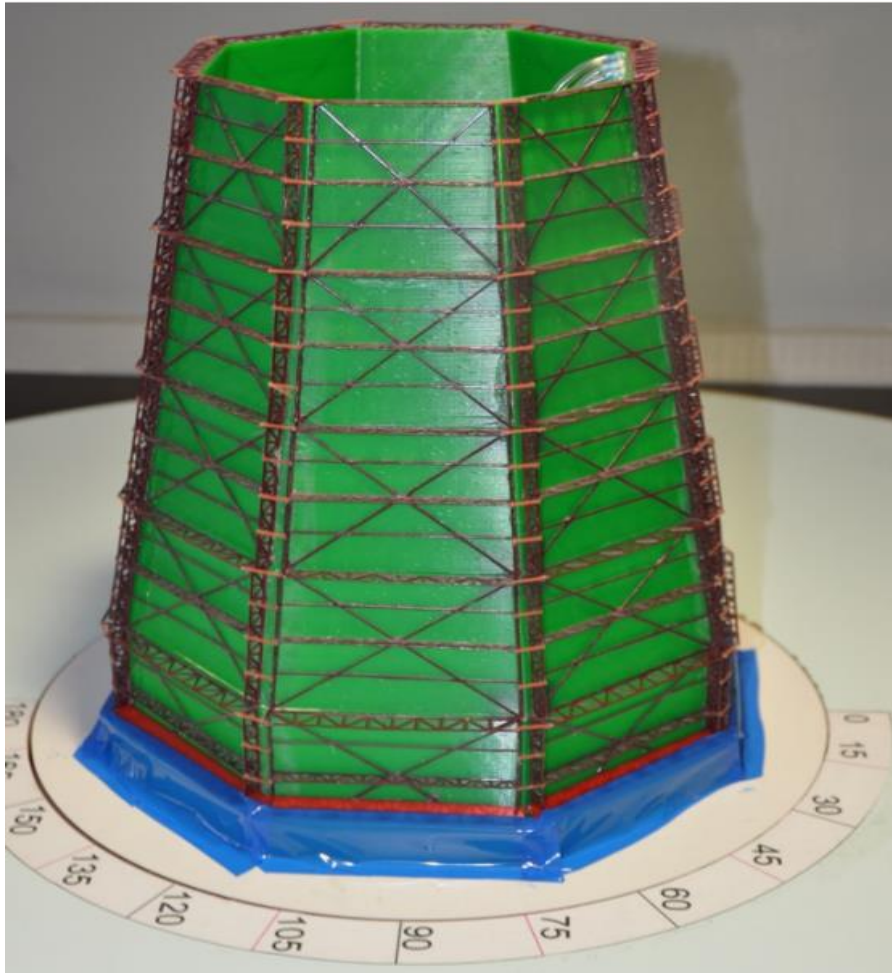
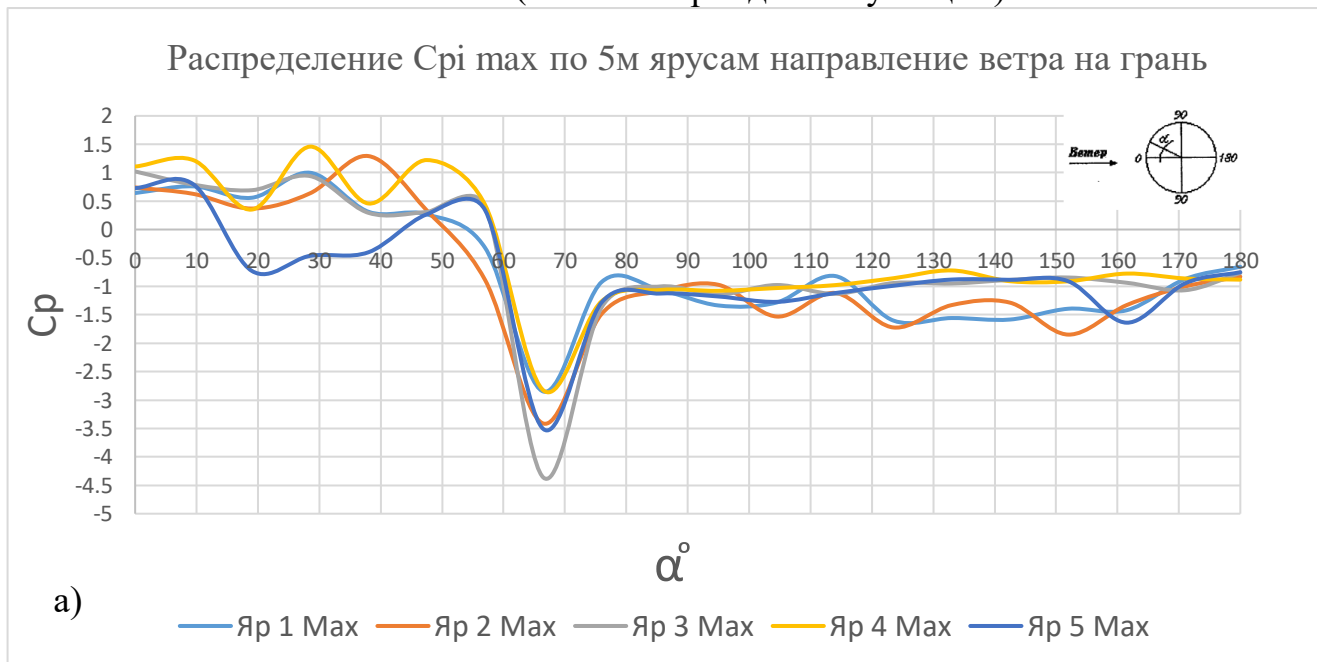


Рисунок В.51 Макет башенной металлической восьмигранной градирни пирамидальной формы площадью орошения 1600м² расположенный в рабочей части МАТ-1(зимний период эксплуатации)



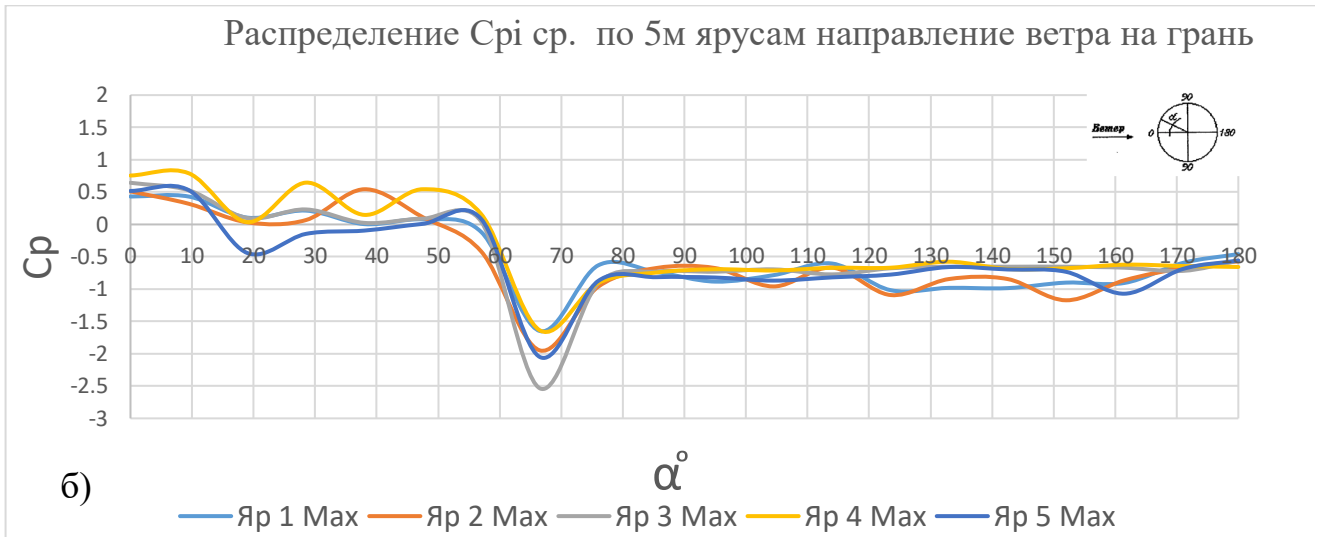


Рисунок В.52 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.

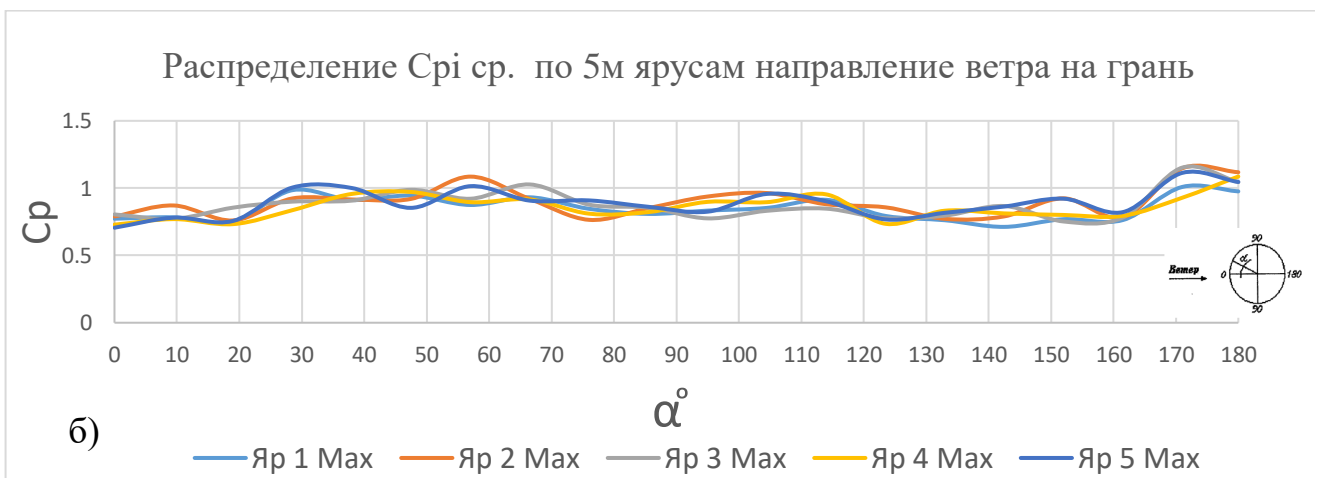
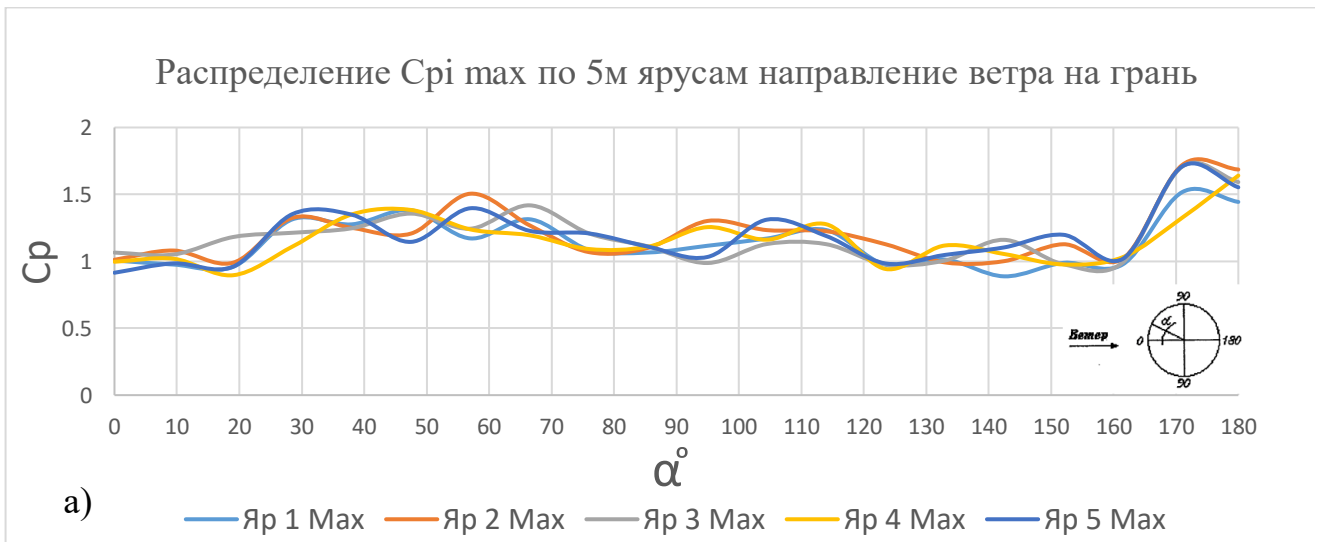


Рисунок В.53 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

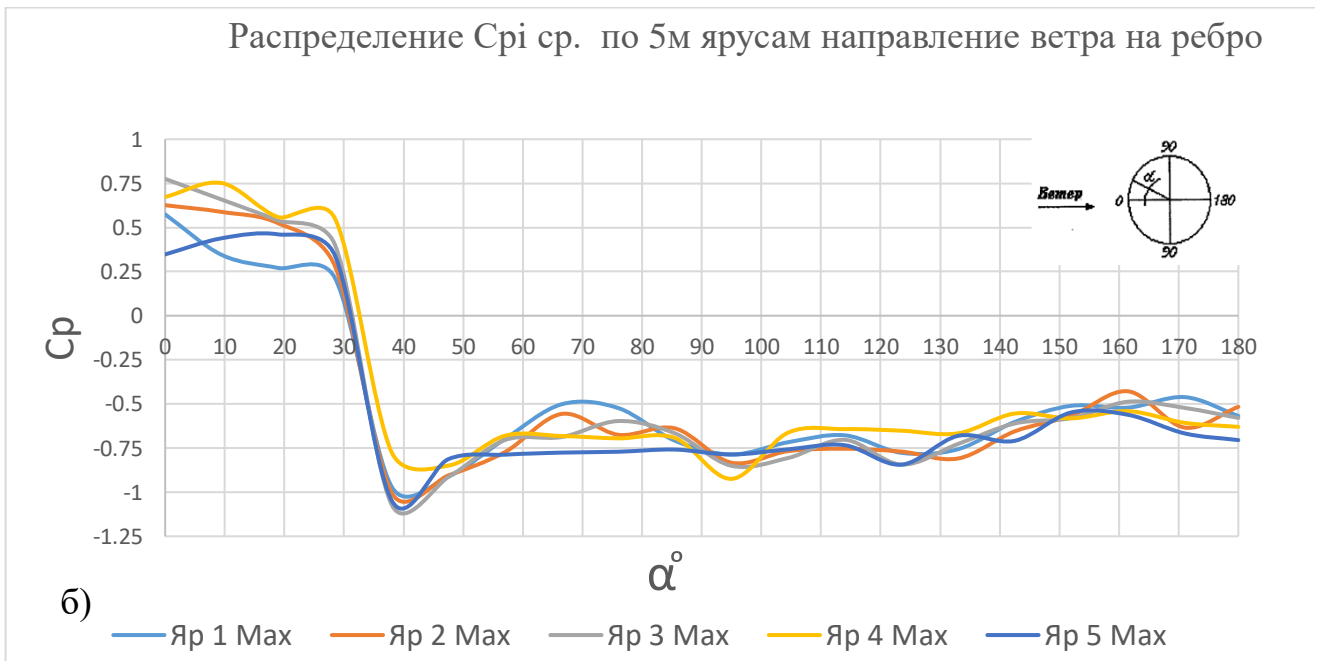
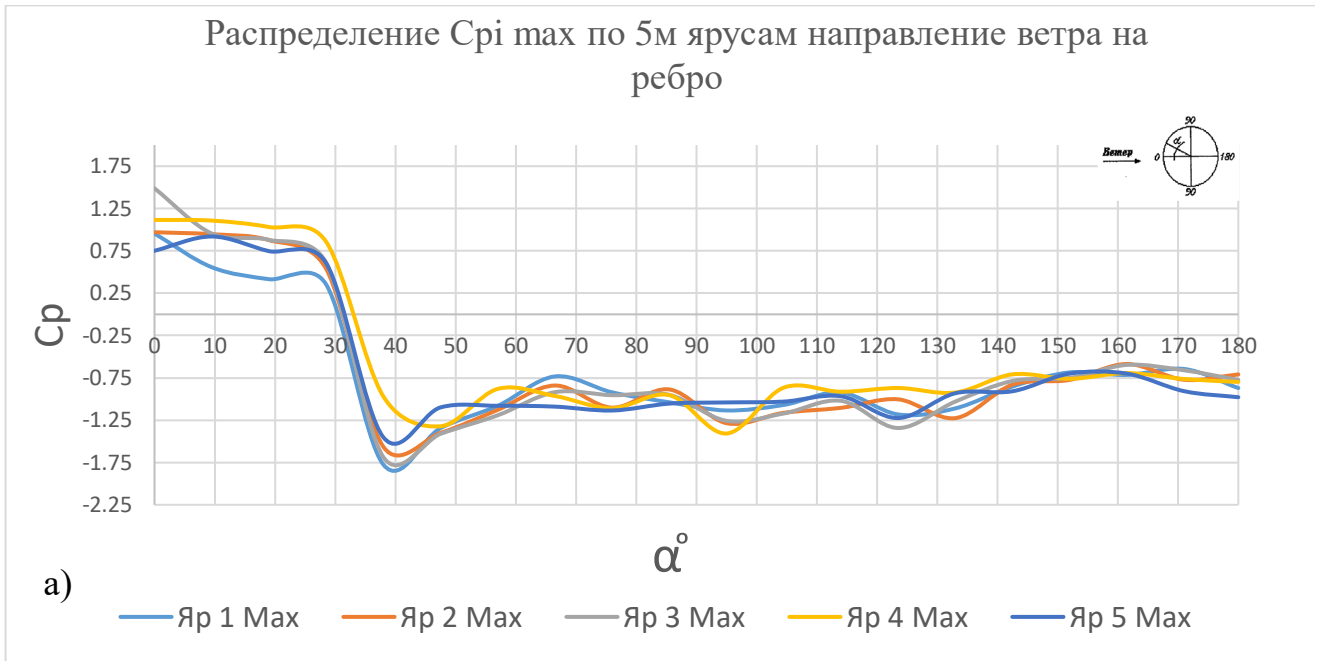


Рисунок В.54 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение $C_{pi} \max$ по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение $C_{pi} \text{ ср.}$ по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро.

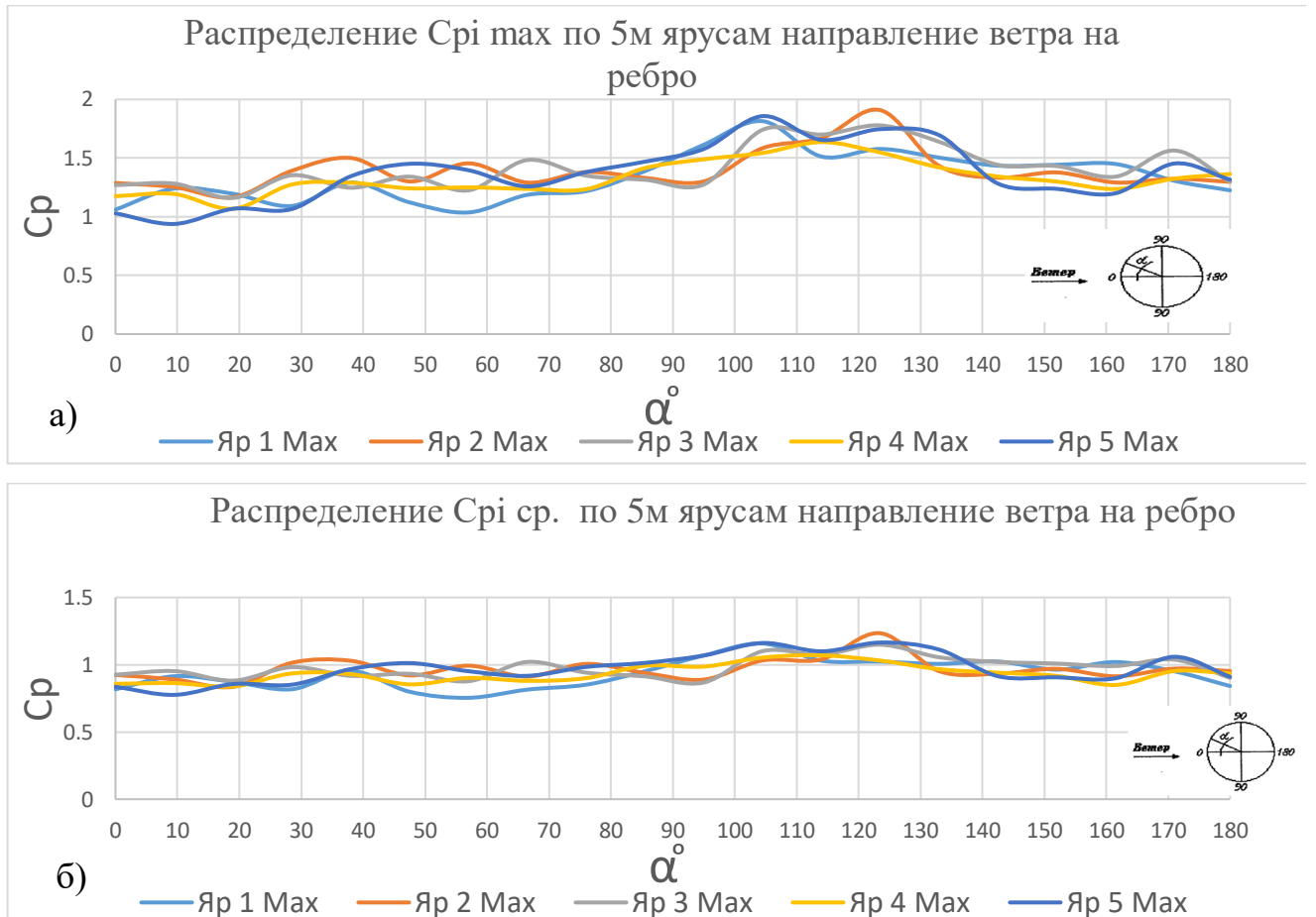


Рисунок В.55 Распределение C_{pi} в зимний период эксплуатации.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро.

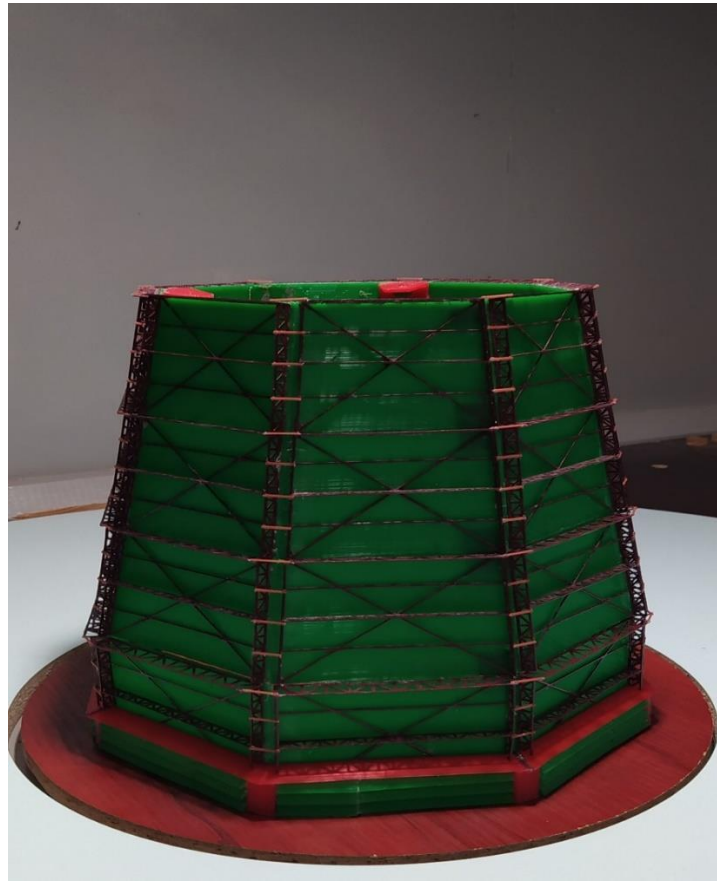
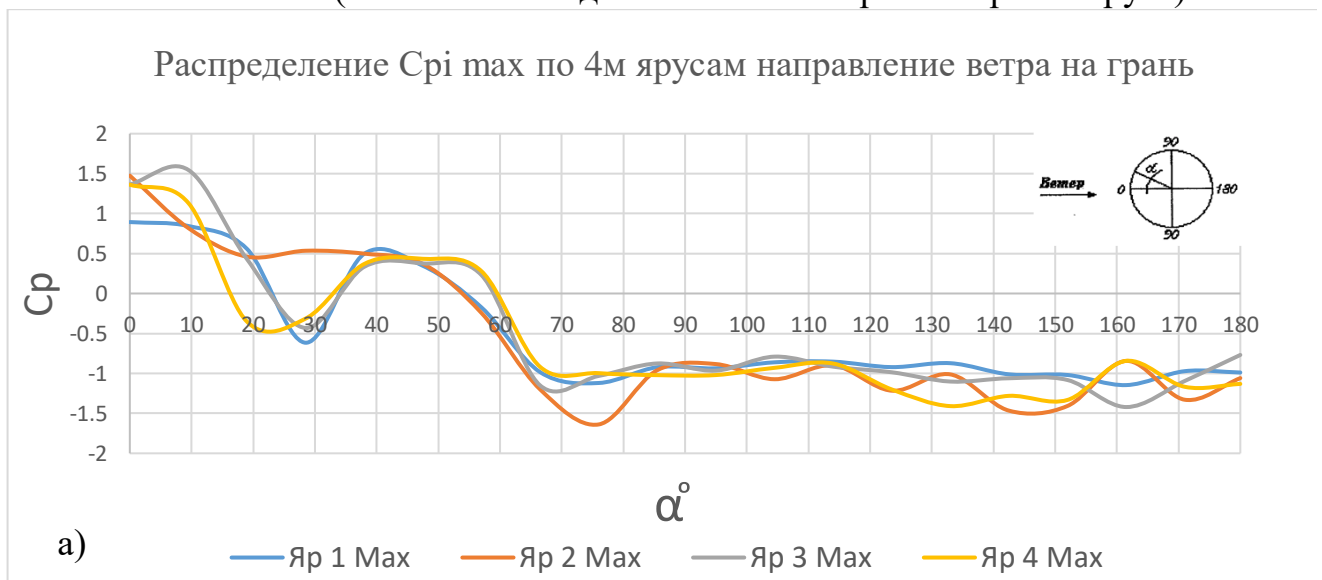


Рис. 56. Макет башенной металлической восьмигранной градирни гиперболической формы площадью орошения 1600м² расположенный в рабочей части МАТ-1(монтажная стадия замыкание карт четвертого яруса)



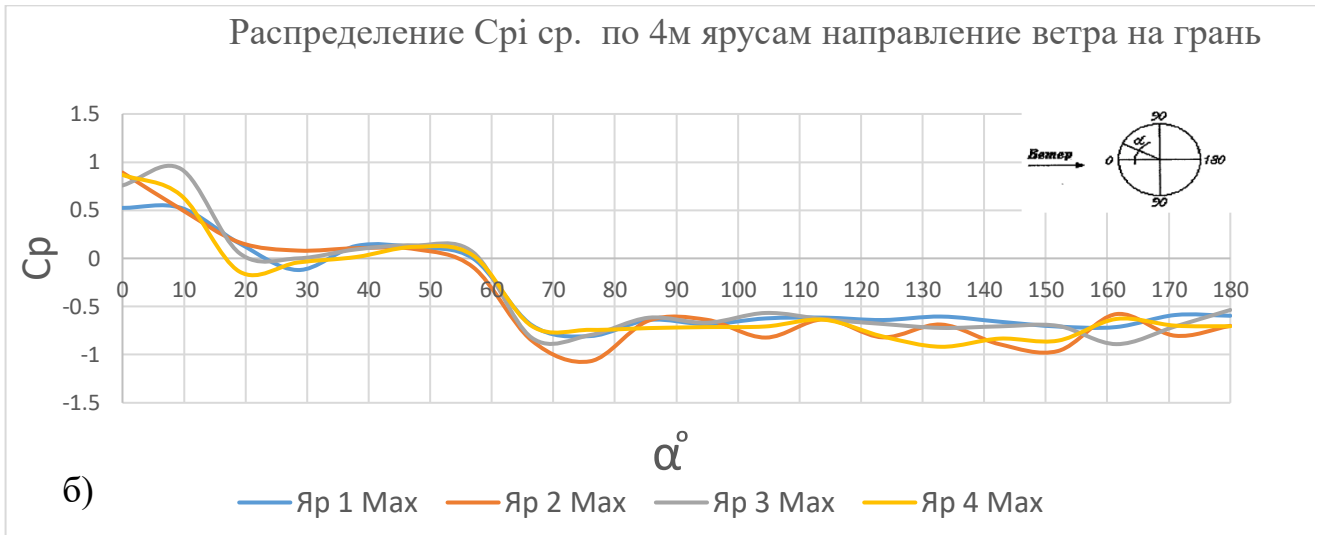


Рисунок В 57 Распределение C_{pi} Монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на грань.

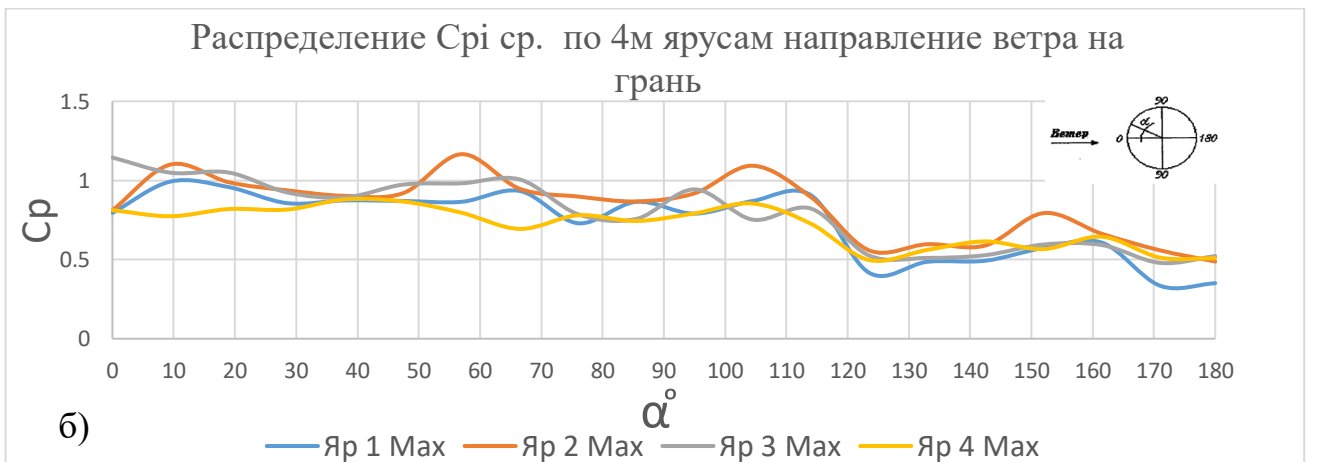
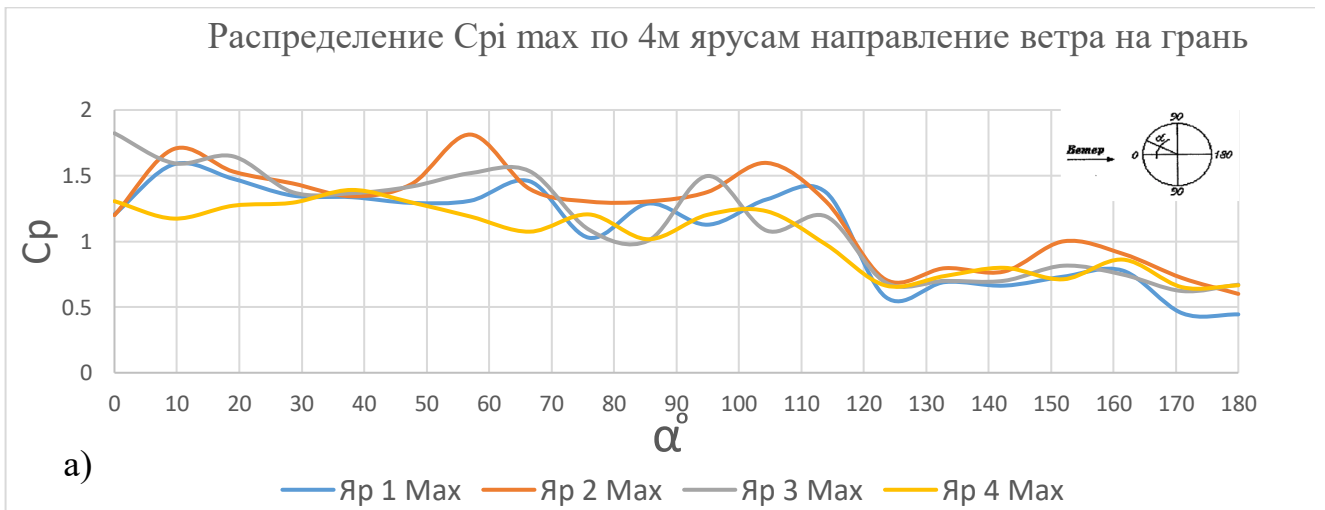


Рисунок В.58 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на грань.

- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на грань.

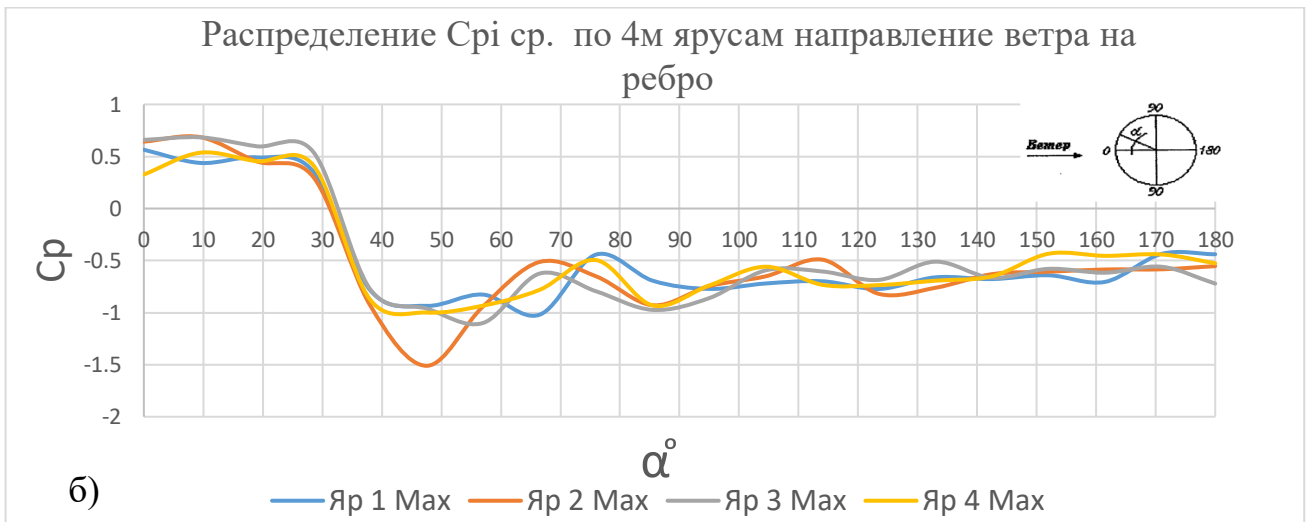
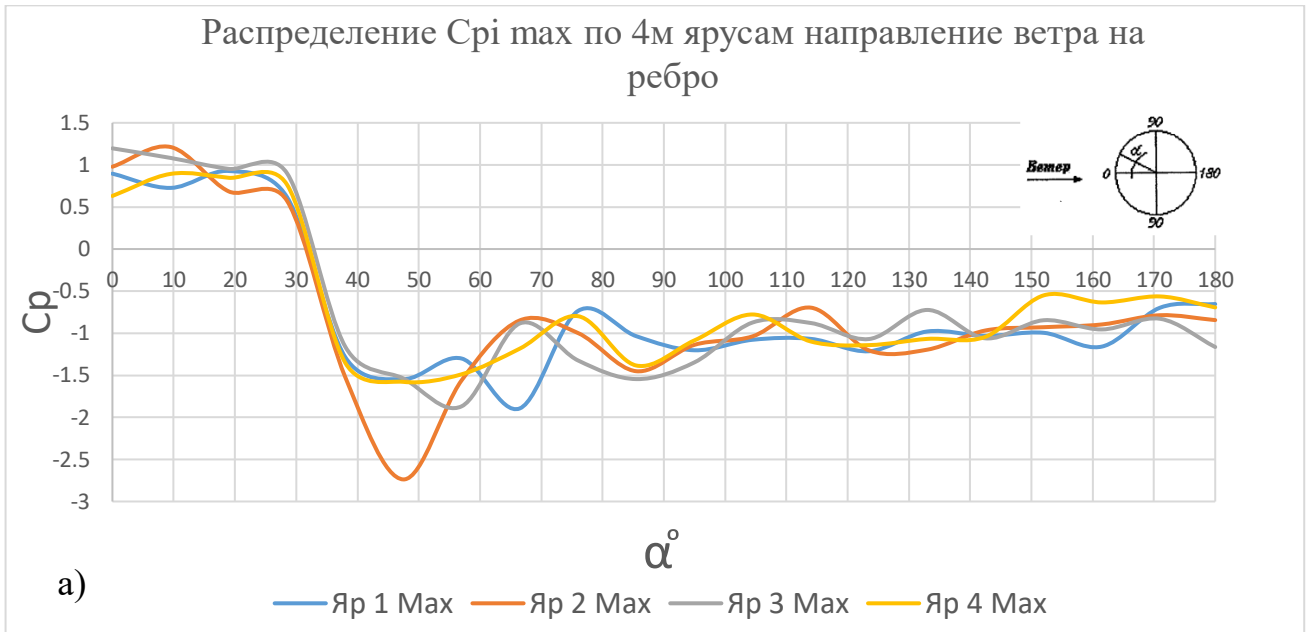
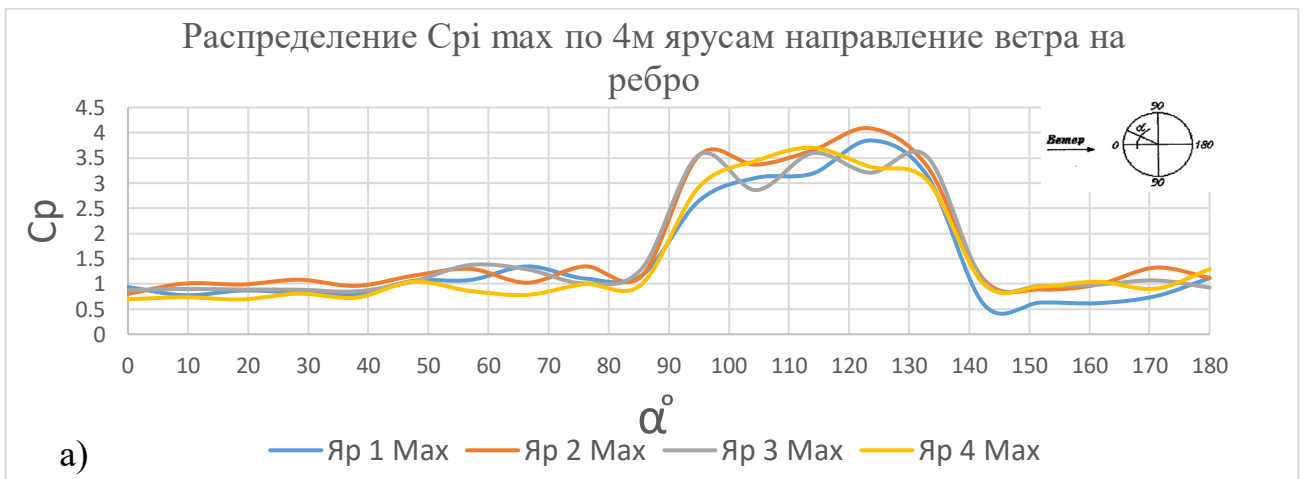


Рисунок В.59 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

- а) распределение C_{pi} max по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внешнему контуру БМГ направление ветра на ребро;



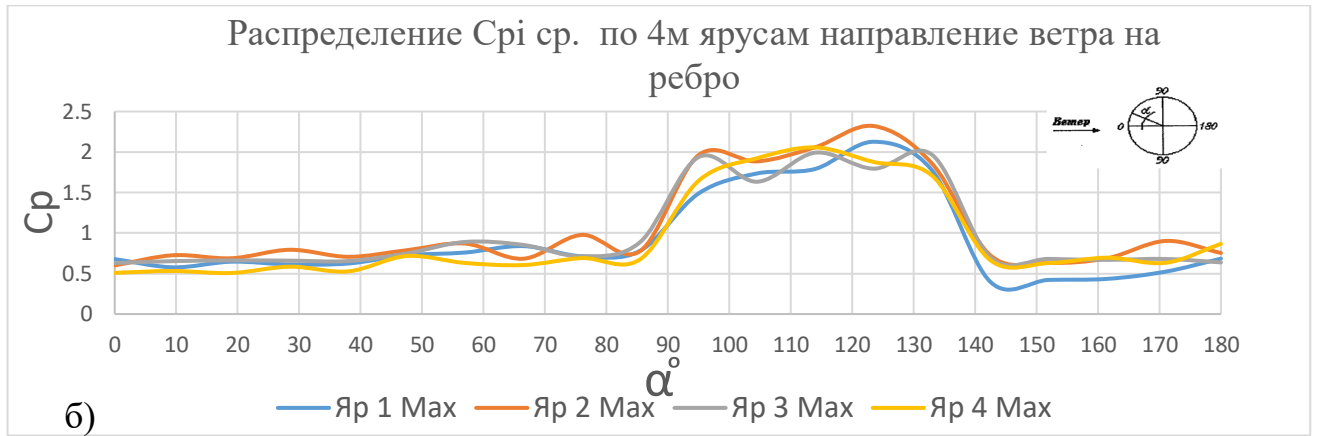


Рисунок В.60 Распределение C_{pi} монтажная стадия замыкания карт четвертого яруса направление ветра на ребро.

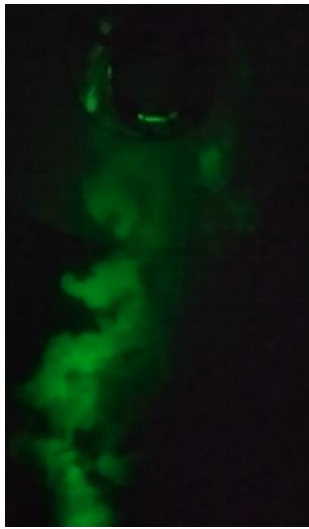
- а) распределение C_{pi} max по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;
 б) распределение C_{pi} сред. по внутреннему контуру БМГ направление ветра на ребро;

Приложение Г

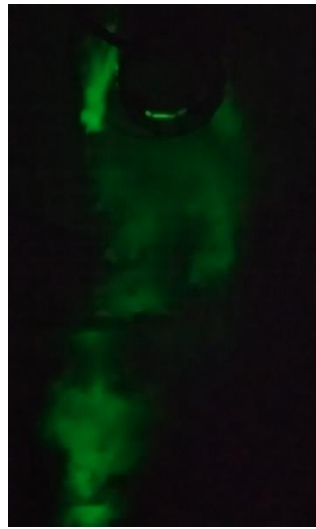
Визуализация ветрового потока на башенную металлическую двенадцатигранную градирню гиперболической формы направление ветрового потока на грань



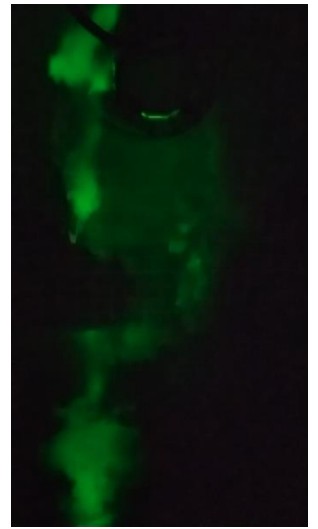
1



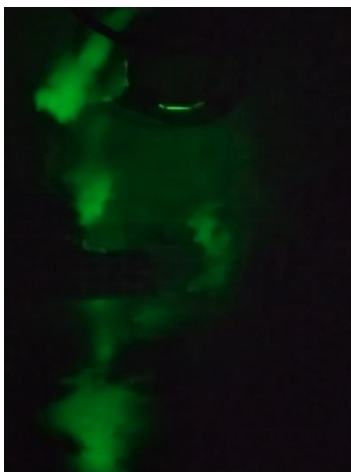
2



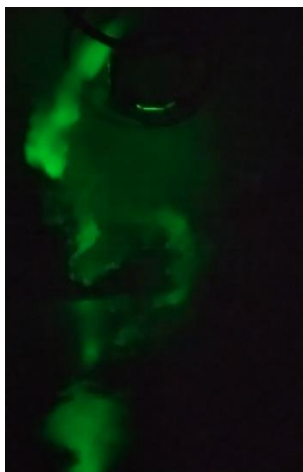
3



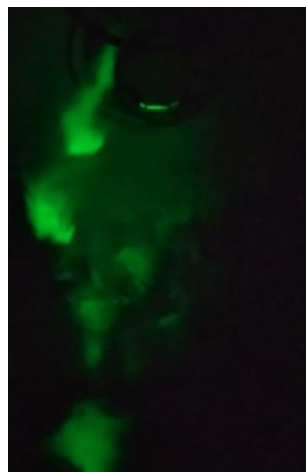
4



5



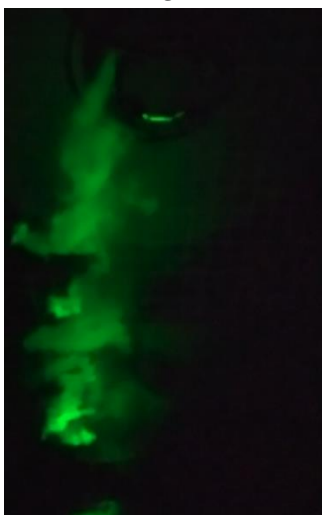
6



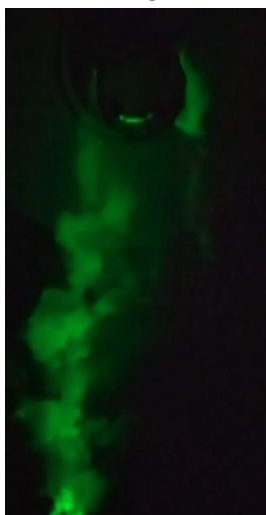
7



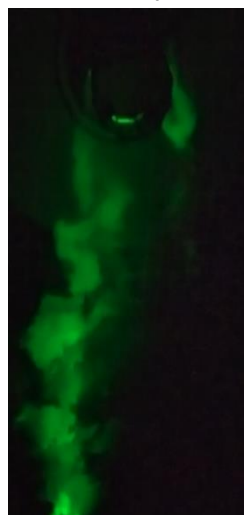
8



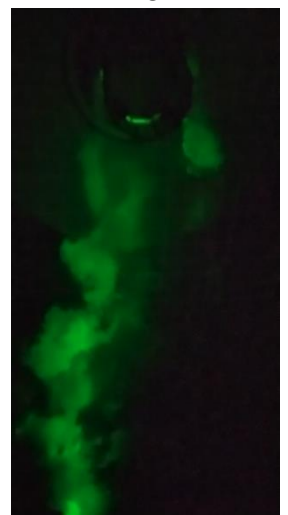
9



10

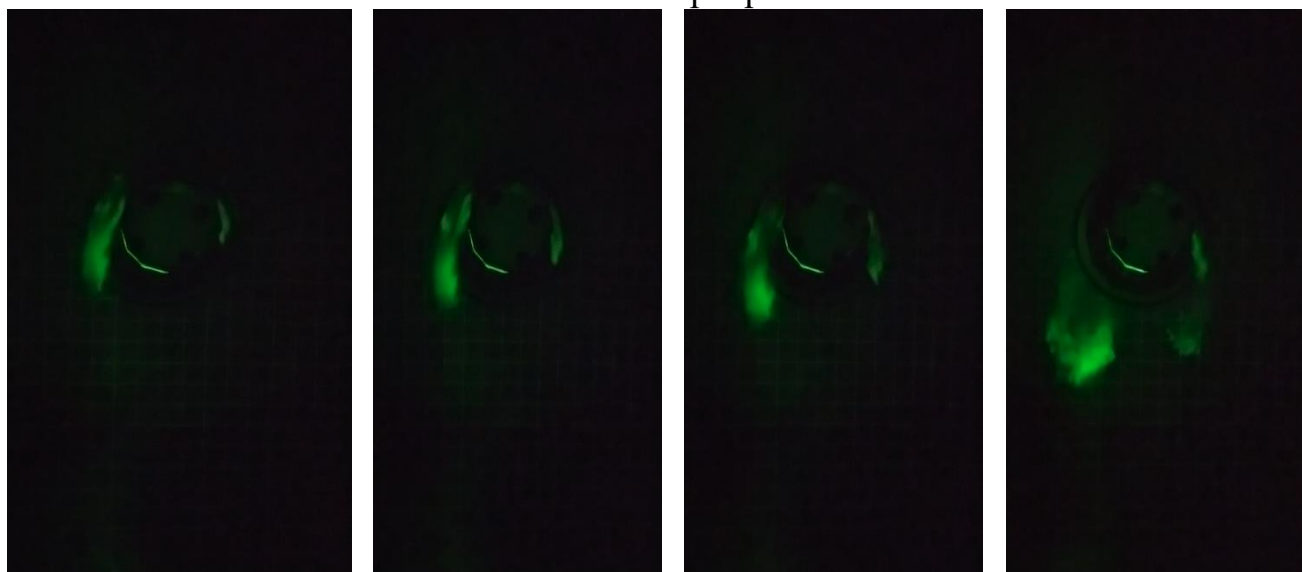


11



12

Визуализация ветрового потока на башенную металлическую двенадцатигранную градирню гиперболической формы направление ветрового потока на ребро

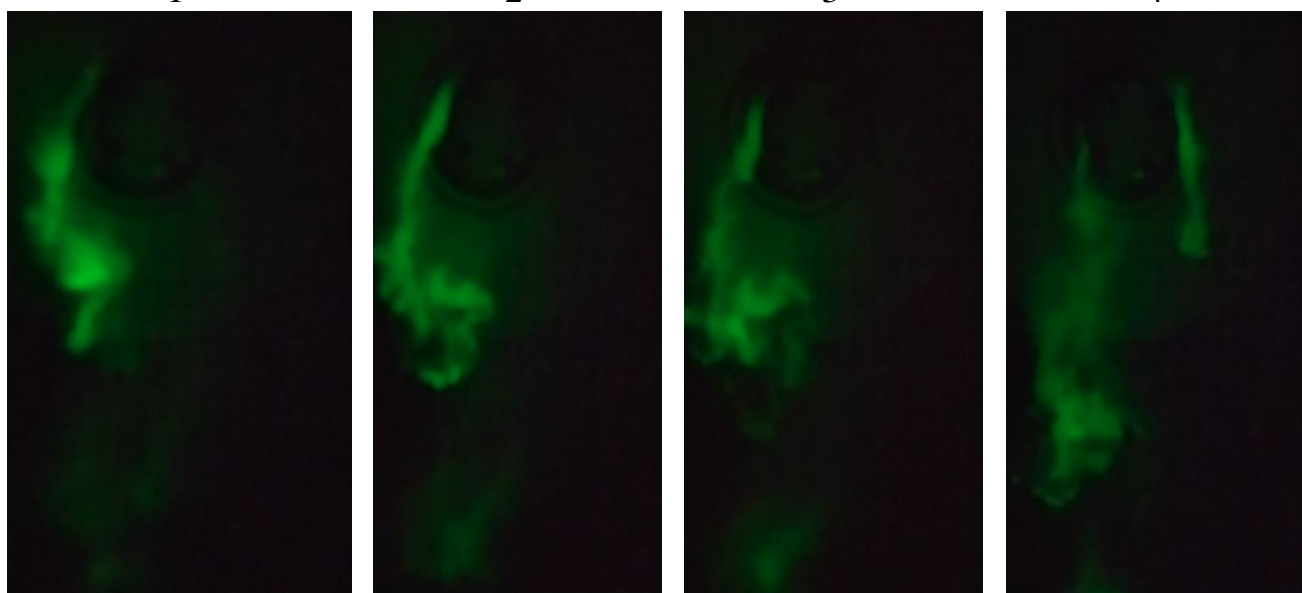


1

2

3

4

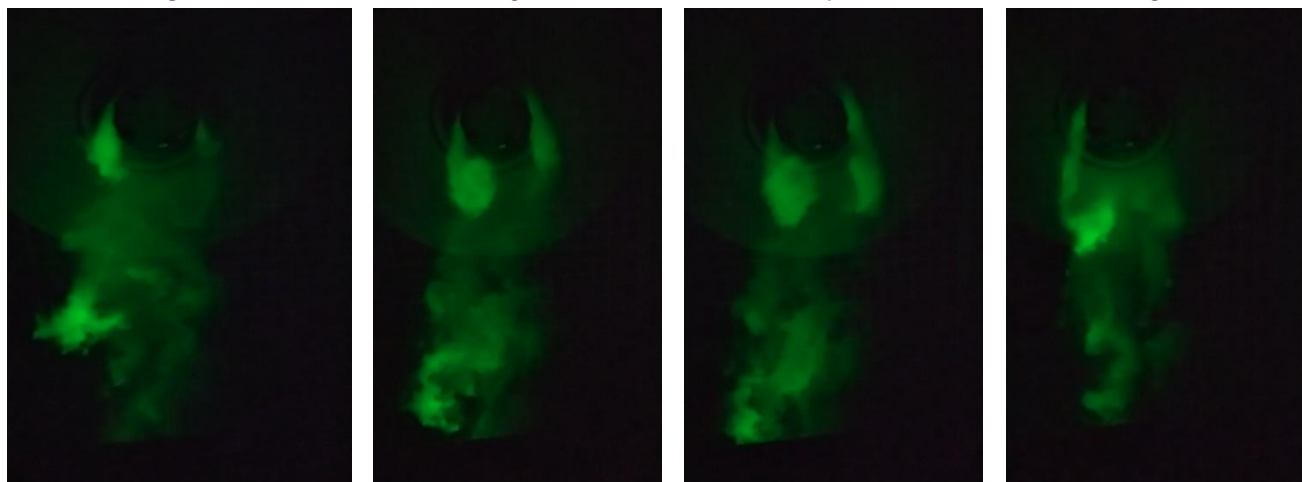


5

6

7

8



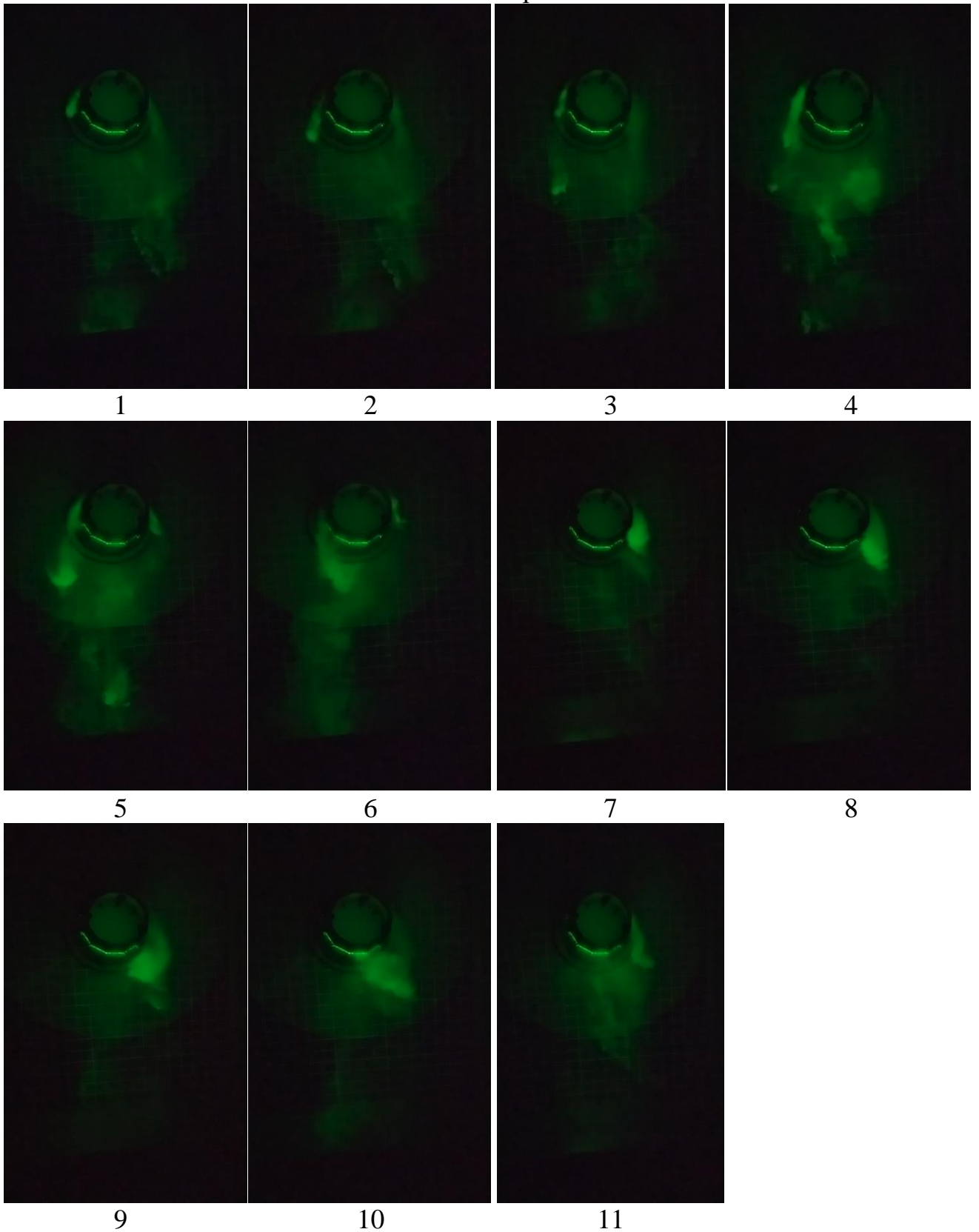
9

10

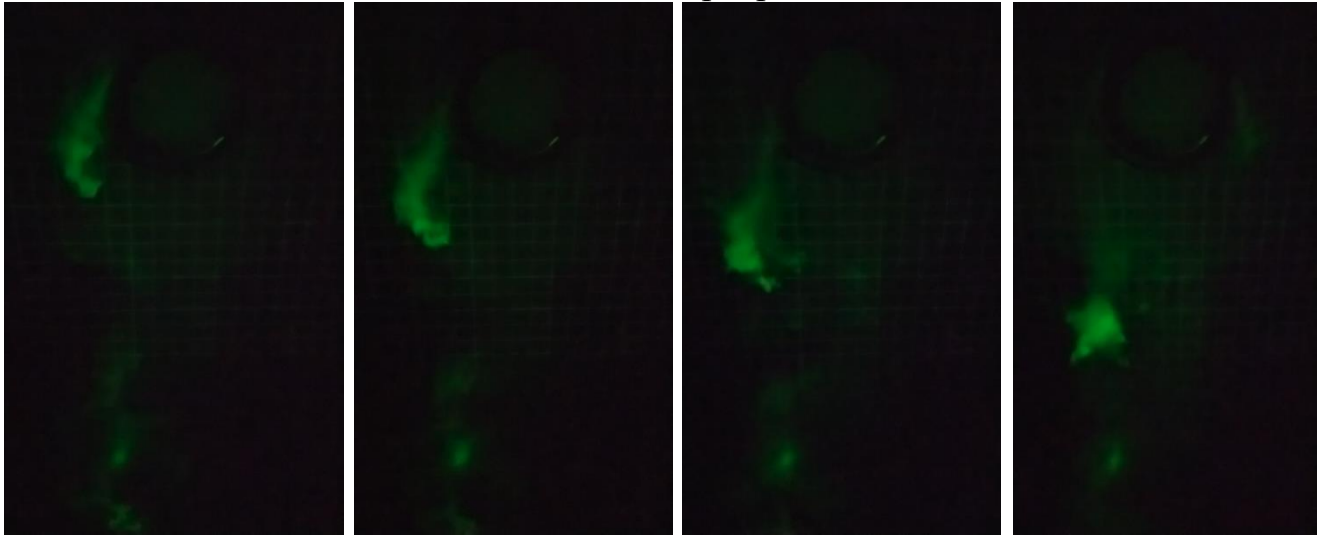
11

12

Визуализация ветрового потока на башенную металлическую двенадцатигранную градирню пирамидальной формы направление ветрового потока на грань



Визуализация ветрового потока на башенную металлическую двенадцатигранную градирню пирамидальной формы направление ветрового потока на ребро

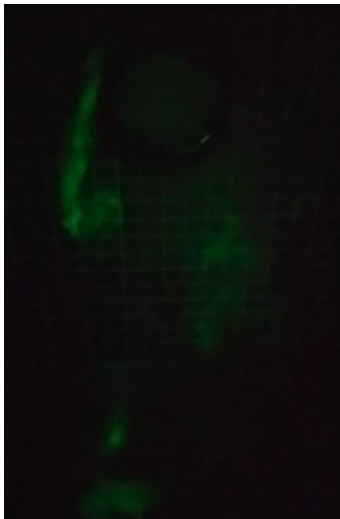


1

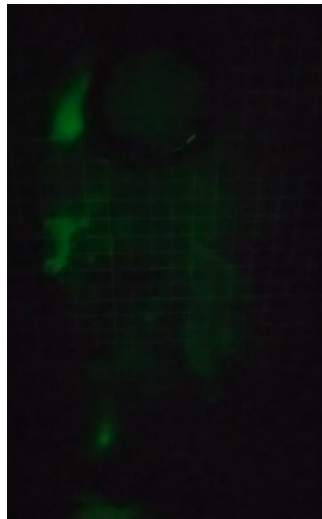
2

3

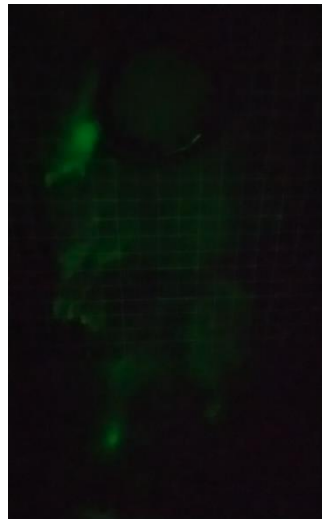
4



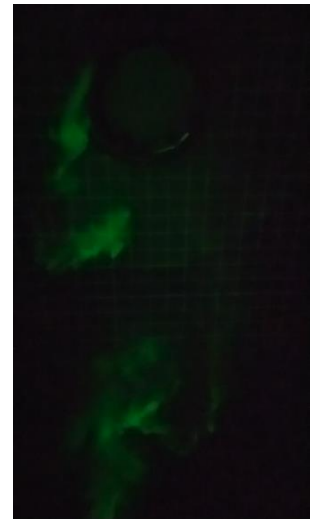
5



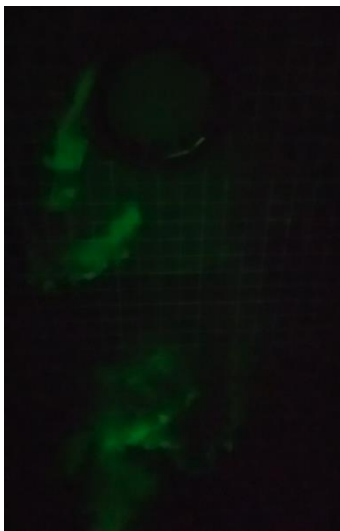
6



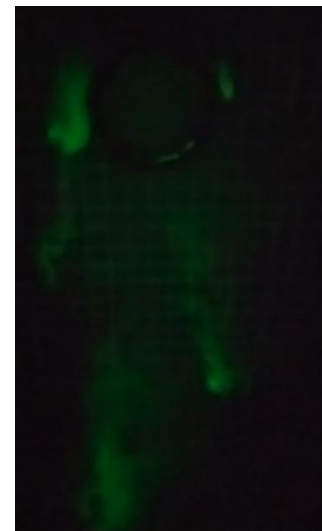
7



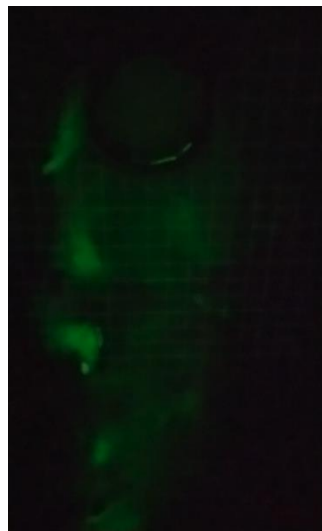
8



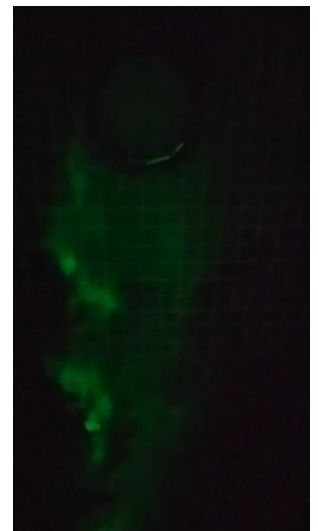
9



10



11



12