

На правах рукописи



Просвирина Ирина Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА СУШКИ ОКРАШЕННЫХ
КРУПНОБЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С
ПРИМЕНЕНИЕМ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР ТЕНТОВОГО ТИПА**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Астрахань
2025

Работа выполнена в государственном бюджетном образовательном учреждении Астраханской области высшего образования «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель:

Яковлев Павел Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» Энергетического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (СПГУ, г. Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты:

Жуков Владимир Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой судостроения и энергетических установок ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург)

Корниенко Сергей Валерьевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Архитектура зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Ведущая организация

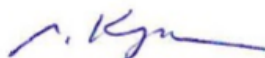
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (ФГБОУ ВО «СПбГУПТД»), г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 27 мая 2025 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета У.2.4.6.41 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГК-2, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.14.04
д.т.н., с.н.с.



Куколев М. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшим из этапов изготовления металлических конструкций является их окрашивание.

В зимний период при отрицательных температурах наружного воздуха процесс сушки окрашенных крупногабаритных металлических конструкций затрудняется. Изготовление металлоконструкций происходит круглогодично и любые простои связаны со значительными финансовыми потерями, особенно в зимний период, в том числе и на таком важнейшем этапе, как окрашивание.

При отрицательных температурах наружной среды сушка окрашенных металлических конструкций происходит медленнее и с нарушением целостности поверхности. Нормальными условиями для покраски считаются температура 10-20 °С, влажность 60-65 % и организованная вентиляция для более интенсивного испарения растворителя и его удаления из краски.

Качество покрытия после покраски зависит от температуры окружающей среды.

Исходя из вышеперечисленных проблем, выполнение окрасочных работ и дальнейшая сушка готовых изделий должна осуществляться в специально оборудованных стационарных или временных (тентовых) укрытиях. Существенным недостатком данной системы, напрямую влияющим на температурный режим и качество лакокрасочного покрытия, является неравномерность температурного поля воздуха вокруг высушиваемой детали.

Неравномерность температуры воздуха обусловлена множеством факторов, среди которых точечная подача приточного воздуха, малое термическое сопротивление тентового укрытия, которое, чаще всего выполнено в виде тканевого ограждения, многообразие форм и размеров высушиваемых конструкций, из-за чего при каждой загрузке меняются размеры и формы каналов для движения воздуха, а также изменения климатических условий с внешней стороны ограждения. Отсутствие методик расчёта неравномерности температурных полей внутри укрытия приводит к нарушению технологических режимов сушки лакокрасочного покрытия и, как следствие, снижению качества покрытия крупногабаритных металлических конструкций. Необходимость повышения качества окрасочных работ при непрерывном производственном цикле определяет **актуальность исследования** в этом направлении.

В связи с этим, важнейшим направлением исследования является изучение и моделирование процессов конвективного теплообмена при искусственном поддержании положительной температуры внутри тентового укрытия для улучшения качества покрытия окрашенного изделия и уменьшения времени сушки на основе совершенствования методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем. Реализация такого процесса осуществляется с помощью установки тепловентилятора, размещаемого за пределами укрытия на улице и подающего тепло в тентовое укрытие по воздуховодам.

Степень научной разработанности проблемы.

Исследования процессов конвективного теплообмена для различных объектов освещались в трудах многих отечественных и зарубежных ученых, таких как: А.В. Лыков, С.С. Кутателадзе, М.А. Михеев, С. Патанкар, А.А. Самарский, Д. Ши, В.М. Пасконов и других ученых.

На основании анализа литературных источников установлено, что одновременное влияние свободной и вынужденной конвекции, возникающей при теплообмене между воздухом и стенкой укрытия, и при омывании теплым воздухом от тепловентилятора мало изучено, а также при расчетах не учитывается сложная геометрия емкости с размещённым в ней телом.

Проблемами смешанной конвекции занимались ученые Эккерт Э.Р., Джексон Т.В., Юнг М.Ф., Волков В.В., Шеремет М.А., Кузнецов Г.В. и др., но их исследования проводились на цилиндрических горизонтальных и вертикальных трубах или же для несжимаемой жидкости, а не воздуха.

Кроме того, существующие методы расчёта не учитывают существенных влияющих факторов, что позволяет сделать выводы о недостаточной изученности проблемы теплообмена в тентовом укрытии.

Анализ позволил сформулировать основные направления исследования и проблемы, требующие решения, среди которых необходимость разработки математической модели и методики расчета процесса нестационарного теплообмена с учетом климатических и технологических особенностей, и создании алгоритма, позволяющего подбирать тепловентилятор. Определены существенные особенности и определяющие режимные параметры систем вентиляции и отопления тентовых укрытий для сушки окрашенных крупногабаритных металлоконструкций на построечном месте.

Целью работы является совершенствование метода расчёта параметров системы обеспечения теплового режима теплопотребляющего оборудования воздушной системы отопления в тентовом укрытии при сушке крупногабаритных металлических конструкций, и создании алгоритма расчёта для повышения эффективности использования энергетических ресурсов в использующих теплоту системах и установках.

Объектом исследования является система обеспечения теплового режима промышленного объекта тентового укрытия с окрашенным модулем крупногабаритной металлической конструкции, сушка которой осуществляется на монтажной площадке в комплексе с теплопотребляющим оборудованием.

Предметом исследования являются процессы переноса энергии при смешанной конвекции и радиационном теплообмене при сушке крупногабаритной металлической конструкции в тентовом укрытии в зимний период.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Определить существенные особенности процессов тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для передачи и потребления теплоты и определяющие режимные параметры систем вентиляции и отопления тентовых укрытий для сушки крупногабаритных металлических конструкций на монтажной площадке с целью улучшения их технико-экономических характеристик и экономии энергетических ресурсов. Разработать и реализовать численную модель оптимизации системы теплоснабжения при сушке металлических окрашенных деталей в зимний период с учетом технологических особенностей тентового укрытия.

2. Теоретически и экспериментально исследовать режимы работы энерготехнологической системы теплоснабжения сушильной камеры тентового типа.

3. Получить теоретические и экспериментальные зависимости для расчета процессов теплообмена при сушке металлических окрашенных конструкций в зимний период с целью интенсивного энергосбережения в тепловой технологической системе и разработки оптимальных режимов, экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологическом процессе.

4. На основе полученных зависимостей усовершенствовать метод расчета и оптимизации параметров использующего теплоту технологического процесса, разработать конструктивное решение, технологию и алгоритм, оптимизирующие подбор тепловентиляторов при различных температурах наружного воздуха и конструктивных размерах тентового укрытия.

Научная новизна работы:

1. Разработаны научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов теплотехнического оборудования, использующего теплоту в ограниченном пространстве временного тентового укрытия на основе численной модели конвективного теплообмена при сушке окрашенной металлической конструкции;

2. Для численного моделирования и оптимизации энерготехнологической системы процесса переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в ограниченном пространстве укрытия предложено в качестве граничного условия использовать главную характеристику вентилятора калорифера;

3. В результате численного моделирования и оптимизация энерготехнологической системы выявлено образование вихревых ячеек при движении воздуха в пространстве между высушиваемой металлической конструкцией и стенкой тентового укрытия, связанное с взаимным

влиянием свободной и вынужденной конвекции во внутритентовом пространстве, приводящее к колебательному характеру изменения температуры воздуха на поверхности конструкции;

4. Получено критериальное уравнение для расчета неравномерности температурного поля на поверхности металлической конструкции, усовершенствован метод расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования сушильных камер тентового типа, разработан алгоритм подбора теплогенерирующего оборудования и технологических параметров.

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования с применением программных средств «ANSYS», «SOLIDWORKS» и офисных пакетов программ статистической обработки данных. Основным методом исследования выбран метод численного моделирования с экспериментальной проверкой адекватности полученных результатов. Обработка результатов осуществлялась в безразмерном виде, с использованием теории подобия.

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась на физической модели тентового укрытия с размещенным внутри окрашенным металлическим изделием в масштабе 1:25.

Численные исследования и лабораторные эксперименты проводились на базе кафедры «Инженерные системы и экология» Государственного автономного образовательного учреждения Астраханской области высшего образования «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет».

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением основных законов теплообмена, методов решения дифференциальных уравнений и численных методов исследования температурных полей, разработкой методики опытно-экспериментальной работы, подтверждением основных результатов исследования с помощью констатирующего эксперимента, научной обработкой данных, полученных при расчетах и экспериментально.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается:

1. Разработаны научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующей теплоту системы обеспечения теплового режима временного тентового укрытия для сушки окрашенной крупногабаритной металлической конструкции.

2. Предложена численная модель процесса стационарного теплообмена при сушке окрашенной крупногабаритной металлической конструкции в ограниченном пространстве временного тентового укрытия с учетом сложных начальных и граничных условий;

3. Выявлена особенность конвективного теплообмена в тентовом укрытии, обусловленные совместным влиянием свободной и вынужденной конвекции с образованием вихревых ячеек;

4. Усовершенствован метод расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования на основе полученного в результате исследования критериального уравнения для расчета температурного режима поверхности металлической конструкции внутри тентового укрытия в процессе сушки.

Практическая значимость

1. Разработан метод повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании, основанный на полученной критериальной зависимости для расчета температурного режима поверхности окрашенной металлической конструкции при ее сушке во временном тентовом укрытии на построечном месте с учётом геометрических особенностей металлоконструкции и тентового укрытия, при переменных климатических условиях с целью улучшения технико-экономических характеристик камеры и экономии энергетических ресурсов.

2. Усовершенствован метод расчета, оптимизации параметров и подбора калориферов при различных температурах наружного воздуха и конструктивных размерах тентового укрытия с

целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологическом процессе сушки (свидетельство на программу ЭВМ № 2021615817 от 13.04.2021).

3. Предложена оригинальная конструкция тентового укрытия для сушки окрашенных модулей, обеспечивающая повышение эффективности использования энергетических ресурсов, учитывающая выявленные в исследовании особенности процессы теплообмена, на которую получен патент (№ 201290 от 08.12.2020).

Практическое использование результатов работы: были внедрены в работу Акционерного общества «Южный центр судостроительства и судоремонта», используются фирмой ООО «Волгоспецмонтаж» для окрашивания наружных трубопроводов систем теплоснабжения в холодное время года при отрицательных температурах наружного воздуха, разработка «Энергосберегающее шатровое укрытие», использовалась в приоритетной теме НИР «Создание улучшенных и энерго-ресурсосберегающих технологий в системах теплоснабжения на основе ВИЭ» Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, внедрены в учебный процесс для студентов направления 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» Астраханского государственного архитектурно-строительного университета.

Личный вклад автора. В диссертации изложены результаты исследований, полученные автором самостоятельно, а также совместно с научным руководителем. При этом автору принадлежат: выбор методологии теоретических и экспериментальных исследований; разработка математической модели; планирование, организация и проведение экспериментов, обработка, анализ и обобщение полученных данных, обоснование выявленных зависимостей.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на научных конференциях: на V Международном научном форуме молодых ученых, студентов и школьников «Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования г. Астрахань, 2016 г.), X Международной научно-практической конференции «Перспективы развития научно-технического сотрудничества стран – участниц Евразийского экономического союза» (г. Астрахань, 2016 г.), XI Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов «Перспективы социально-экономического развития стран и регионов» (г. Астрахань, 2017 г.), Международной научно-практической конференции «Экология и нефтегазовый комплекс» (Атырау, 2018 г.), VII Международном научном форуме молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников «Потенциал интеллектуально одаренной молодежи - развитию науки и образования» (г. Астрахань, 2018 г.), IV Национальной научно-практической конференции «Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования» (г. Астрахань, 2021 г.), VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика» (г. Уфа, 2021 г.), конференции «Intelligent Information Technologies and Mathematical Modeling» (2021 г.), XVI Международной научно-практической конференции «Перспективы развития строительного комплекса: образование, наука, бизнес» (2022 г.), расширенном семинаре Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики СПбПУ (г. С.-Петербург, 2022 г.), XII Международном научном форуме молодых ученых, специалистов, студентов и школьников «Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования» (г. Астрахань, 2023 г.), XVIII Международная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов «Перспективы развития строительного комплекса: образование, наука, бизнес» (Астрахань, 2024 г.).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 8 в рецензируемых журналах. В работах, приведенных в списке литературы и опубликованных в соавторстве соискателю принадлежат: [8] – 40%; [1-7], [10], [11], [16] – 60%; [9], [12-15] – 100%.

На защиту выносятся:

1. Численная модель процесса тепло- и массопереноса в тепловой системе с условиями однозначности энерготехнологической системы тентового укрытия для сушки крупногабаритных модулей металлоконструкций, в том числе металлических конструкций.

2. Результаты численного и экспериментального исследований процесса теплообмена при

сушке крупногабаритных модулей металлоконструкций во временном тентовом укрытии на монтажной площадке с целью улучшения их технико-экономических характеристик и экономии энергетических ресурсов.

3. Критериальное уравнение для расчета технологических режимов сушки крупногабаритных модулей металлоконструкций во временном тентовом укрытии на монтажной площадке с учетом климатических особенностей и параметров системы воздушного отопления с целью оптимизации параметров тепловых технологических процессов и разработки оптимальных схем.

4. Методика расчета системы обеспечения теплового режима окрашенных поверхностей модулей крупногабаритных металлоконструкций в тентовом укрытии и их совершенствования с целью повышения эффективности использования энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологическом процессе сушки.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и 5 приложений. Объем составляет 106 страниц, 34 рисунка и 6 таблиц. Список использованной литературы содержит 117 наименований.

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, а именно п. 4. Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах; п. 6. Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках; п. 8. Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, а также всему коллективу кафедры «Инженерные системы и экология» ГБОУ АО ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования, выделены цель, объект, предмет, задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, раскрываются научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены параметры крупногабаритных металлических конструкций, проведен анализ технологических режимов окрашивания корпусных деталей, определены факторы необходимости окрашивания металлических поверхностей. Обобщены существующие данные по использованию воздушных систем отопления при окрашивании и сушки крупногабаритных металлических конструкций при отрицательных температурах наружного воздуха.

Выполнен обзор литературных и современных источников по исследованию теплообмена в замкнутом объёме временного тентового укрытия на монтажной площадке, который позволяет сделать выводы о недостаточной изученности проблемы теплообмена в тентовом укрытии.

Анализ позволил сформулировать основные направления исследования и проблемы, требующие решения, среди которых необходимость разработки математической модели и методики расчета процесса нестационарного теплообмена с учетом климатических и технологических особенностей, и создании алгоритма, позволяющего подбирать тепловентилятор.

Во второй главе изложены методики расчёта процессов теплообмена в помещениях для сушки металлических конструкций тентового типа, выполнено построение матрицы факторного эксперимента и расчётной 3d модели тентового укрытия, определены начальные и граничные условия исследования.

Отмечено, что разработка и выбор оптимальных вариантов взаимного размещения места подачи теплого воздуха в сушильную камеру и отверстий для удаления паров растворителя от

сохнувшего окрашенного изделия связано со сложными процессами, когда температура внутри камеры изменяется в пространстве в трех направлениях, определяемыми полем скоростей обтекающего высушиваемую деталь воздуха. При этом температура окрашенной детали стремится к тепловому равновесию, поэтому целью исследований являются физические особенности такого рода процессов, разработка численной модели процесса теплообмена в камере и получения обобщающей зависимости для практических расчётов в условиях производства крупногабаритных металлических конструкций.

Исходными дифференциальными уравнениями в решении задачи формирования температурных полей в тентовом укрытии для сушки металлических конструкций являются уравнение сохранения энергии, учитывающего свободную конвекцию, уравнение движения с гравитационной составляющей и уравнение неразрывности, которые дополняются условиями однозначности: начальными и граничными условиями.

За начальные условия приняты:

- температура наружного воздуха от +10 °С до -30 °С.
- в качестве текучей среды выбран воздух с температурой 20°С (по рекомендованным параметрам сушки) и атмосферным давлением (760 мм рт. ст.).
- за материал тента принят полиэстер PU 190T RipStop, материал окрашенной детали – конструкционная сталь.

Пространственное краевое условие третьего рода связывает температуру внутренней стенки шатра с температурой внутреннего воздуха через пересчитываемые на каждом шаге расчёта значения коэффициента теплоотдачи и скорректированное значение температуры внутренней стенки шатра. При этом плотность теплового потока через стенку:

$$q_n = \frac{(T_{\text{вн.возд}} - T_{\text{нар.возд}})}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}} \quad (1)$$

От внутренней стенки шатра к окружающей среде принято также граничное условие третьего рода, заданное коэффициентом теплопередачи, которое учитывает термическое сопротивление стенки шатра и коэффициент теплоотдачи с внешней стороны, которое составило 15 Вт/м²К.

На поверхности окрашенной детали выполняется граничное условие второго рода с условиями на границе $q_n = 0$, т.к. после начала сушки температуры тонкостенной окрашенной детали и воздуха становятся равны в течение первого часа.

Внутри камеры задача сводится к теплообмену при смешанной конвекции. Так как поверхность тента имеет низкую температуру, вблизи ограждающей конструкции возникает свободная конвекция, направленная вниз вдоль холодной стенки. Горизонтальное движение нагретого воздуха под деталью является вынужденным движением и определяется параметрами вентилятора калорифера. Попадая в вертикальный зазор между стенками шатра и детали, тёплый воздух в нижней части сталкивается со стенкой шатра, а затем поднимается вверх вдоль стенки детали, взаимодействуя с нисходящим потоком и создавая вихревые ячейки. В результате в вертикальном зазоре формируется сложное поле скоростей, обусловленное этими тремя факторами.

В модели учитывалось влияние теплообмена излучением. Степень черноты принята для инфракрасного диапазона 0,95, что наиболее близко к используемым материалам.

Отличительной особенностью заданных граничных условий является зависимость подачи вентилятора калорифера от аэродинамического сопротивления сушильной камеры. Т.к. скорость на входе определяется потерями давления в воздушном тракте, в связи с чем на выходе из калорифера может быть задана только главная характеристика самого вентилятора.

В результате численного эксперимента получено изменение температурных полей по ширине тентового укрытия при различных начальных и граничных условиях. Моделирование процессов теплообмена осуществлялось при помощи программного комплекса SolidWork. Основные полученные закономерности иллюстрирует представленное на Рисунке 1 распределение температур рабочей среды при подаче воздуха снизу и удалении его на противоположной стене шатра, а также температурах окружающей среды 0 °С и воздуха на выходе из тепловентилятора 40 °С.

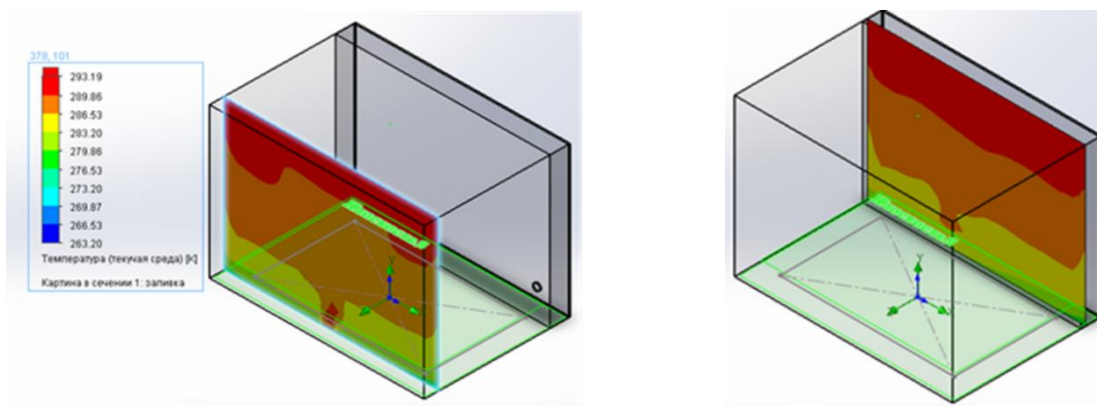


Рисунок 1 - Распределение температур текучей среды

На Рисунке 2 представлен график изменения температур передней, относительно места установки калорифера, и задней грани металлической конструкции.

Как видно из графика, наиболее проблемной, с позиции неравномерности распределения температур, является передняя грань. В зоне подачи нагретого воздуха деталь перегревается почти на 4°C .

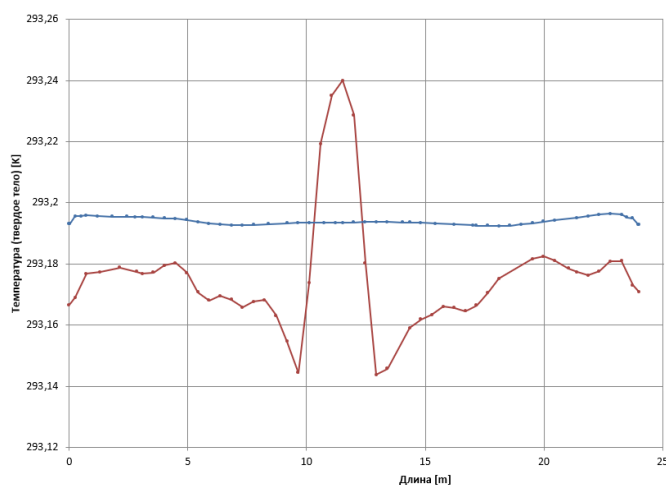


Рисунок 2 - Графики распределения температур по длине передней (красная) и задней (синяя) граней исследуемой детали

Для обобщения полученных результатов и дальнейшего их практического использования в виде обобщающей зависимости использовалась теория подобия. Классический подход к уравнениям, описывающим стационарный теплообмен предполагает использование критериев подобия Рейли (Ra) и Рейнольдса (Re). С этой целью обработка данных осуществлялась в безразмерном виде с использованием теории подобия в виде зависимости $\theta = f(Ra, Re)$. В связи с этим, предложено изменить структуру уравнений, и, в частности, модифицировать обобщающие критерии подобия:

$$Ra = (g \cdot H^3 \cdot \beta \cdot \Delta T) / (\nu \cdot a), \quad (2)$$

где H – высота шатра, м; β – коэффициент объемного расширения, $1/\text{K}$;

ΔT – разность температур воздуха на выходе из калорифера и наружного воздуха, K ; ν – вязкость, m^2/s ; a – коэффициент температуропроводности.

$$Re = (v \cdot h) / \nu, \quad (3)$$

где v – скорость воздуха от вентилятора, m/s ;

h – зазор между полом шатра и деталью, м.

Безразмерная температура:

$$\Theta = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{кал} - T_{окр.ср}} \quad (4)$$

T_{max} – максимальная температура изделия; T_{min} – минимальная температура изделия; $T_{кал}$ – температура воздуха из калорифера; $T_{окр.ср}$ – температура окружающей среды.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования температурных полей в сушильной камере и экспериментальных исследований технологических параметров сушильной камеры.

В процессе численного моделирования было выполнено серия численных экспериментов для изменения влияющих параметров в диапазонах:

- температура наружной среды: $253 \div 273$ К;
- высота шатра варьировалась в пределах $11 \div 17$ м;
- зазор между полом шатра и окрашенной деталью: $0,2 \div 2,0$ м;
- температура воздуха на выходе из калорифера определена максимально допустимой для большинства судостроительных лакокрасочных материалов и принята 313 К.

На Рисунке 3 приведены графики изменения безразмерной температуры в зависимости от высоты тентового укрытия для разных зазоров между полом и днищем окрашенной металлической конструкции.

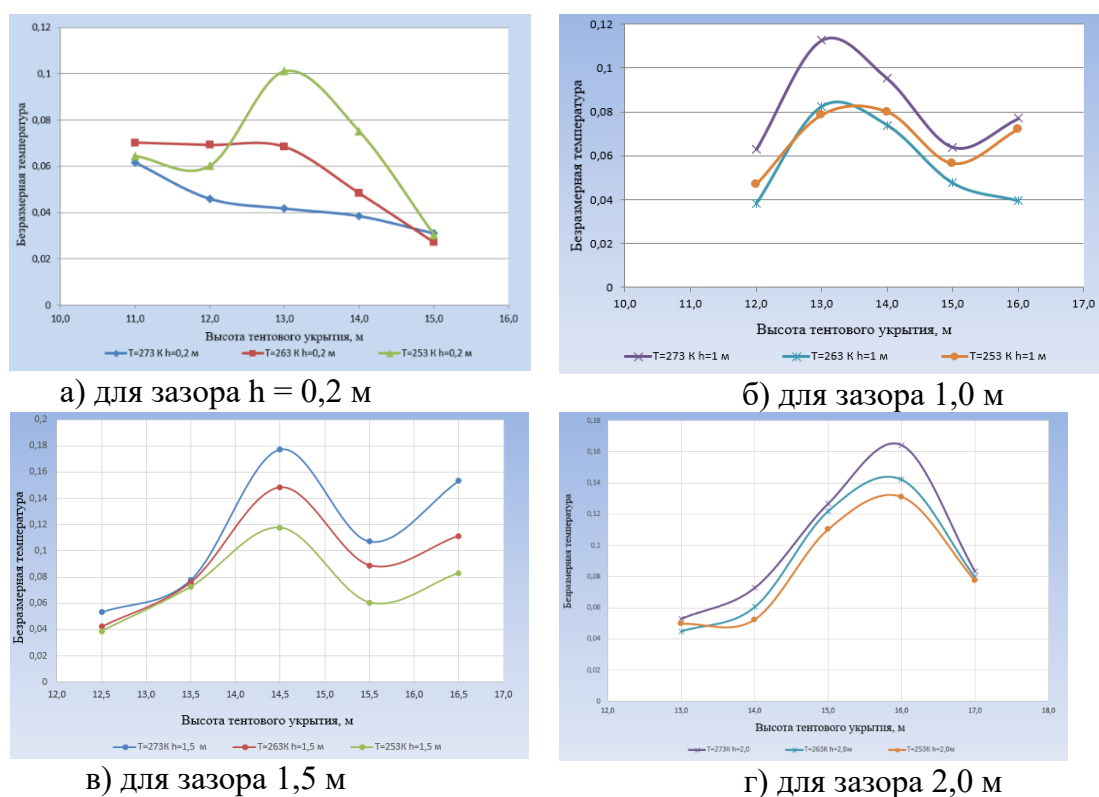


Рисунок 3 - Зависимость безразмерной температуры от высоты тентового укрытия

Из графиков видно, что при разных температурах наружного воздуха наблюдается смешанная конвекция внутри замкнутой полости, причем при минимальной и максимальной высоте она незначительная, а при средней – наибольшая. Это связано с тем, что при минимальной высоте тентового укрытия на распределение температур преимущественно влияет вынужденная конвекция, а при максимальной высоте – свободная конвекция.

Таким образом, выявлены режимы работы сушильной камеры с различным характером взаимного влияния свободной и вынужденной конвекции на неравномерность температурного поля, что подтверждается скачком безразмерной температуры при средней высоте тентового укрытия (Рисунок 3). Также на распределение температур воздуха внутри тентового укрытия влияют и ряд других параметров, что говорит о сложном характере взаимного влияния определяющих параметров. К таким параметрам относятся скорость воздуха на выходе из вентилятора; расстояние между стенками тента и деталью; разность температур между внутренней и наружной средой.

Высота тентового укрытия является основным параметром, влияющим на распределение температур в объеме укрытия, увеличение высоты сопровождается вначале повышением безразмерной температуры, а затем к резкому ее уменьшению. Это связано с тем, что при средней высоте влияние вынужденной конвекции максимально, а при наименьшей и наибольшей высотах преобладает свободная конвекция.

С увеличением температуры наружной среды на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при неизменяющейся температуре воздуха на выходе из тепловентилятора, температура поверхности детали в зоне влияния калорифера увеличивается примерно на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 4).

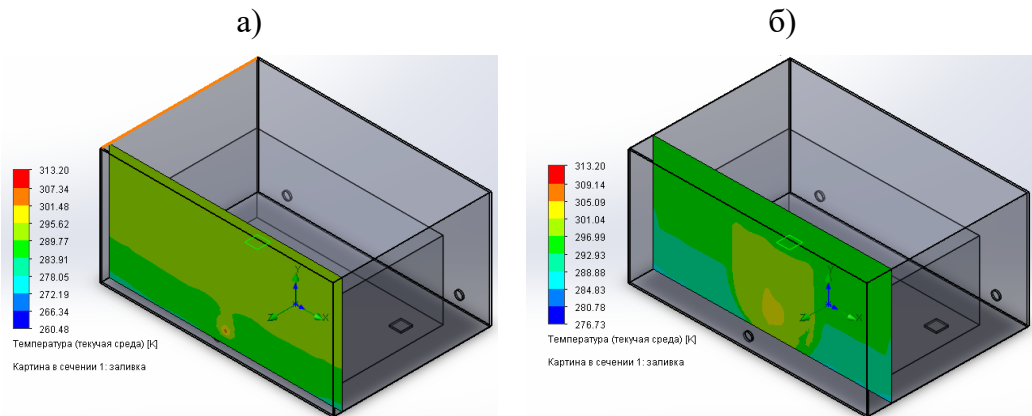


Рисунок 4 - Распределение температур воздуха внутри тентового укрытия вблизи приточного отверстия при температуре наружного воздуха: а – 253 K , б – 273 K

Такое изменение температуры позволяет предопределять последующее ее влияние на параметры воздуха внутри тентового укрытия и задает способы регулирования температуры воздуха на выходе из калорифера для предотвращения дальнейшего перегрева окрашенной металлической конструкции, как это видно на Рисунке 5.

Из графиков видно, что при температуре наружного воздуха 253 K перегрев нижней кромки детали составляет $0,7\text{ K}$ при оптимальной температуре сушки окрашенной детали $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вот уже при 273 K деталь перегревается на $1,1\text{ K}$.

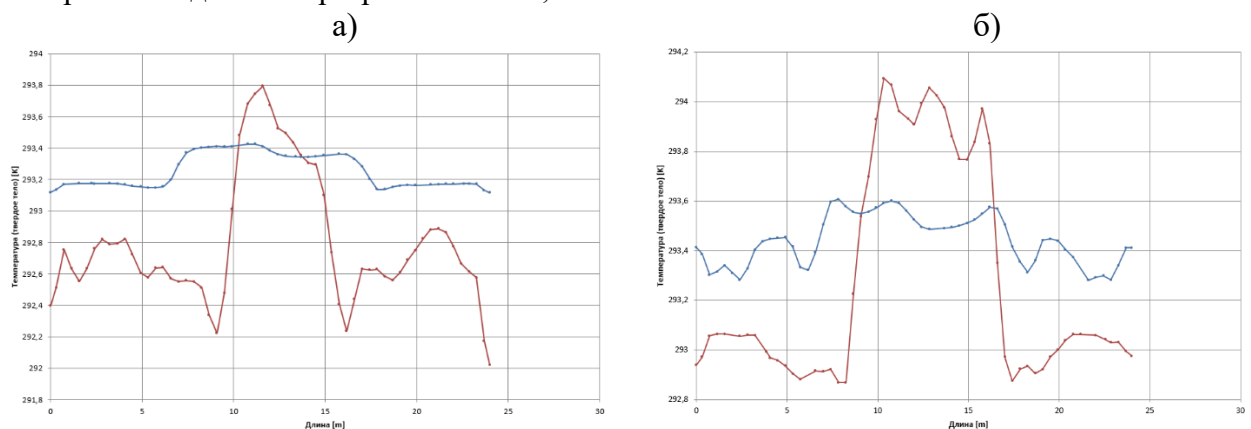


Рисунок - 5 Изменение температур нижней (красная) и верхней (синяя) кромок окрашенной металлической конструкции при температуре наружного воздуха: а – 253 K , б – 273 K

Немаловажным определяющим параметром, влияющим на безразмерную температуру, является зазор между полом тентового укрытия и дном окрашенной металлической конструкции. На Рисунке 6 приведены картины распределения температур внутри тентового укрытия для зазоров $0,2\text{ м}$; $1,0\text{ м}$; $1,5\text{ м}$; $2,0\text{ м}$ при средней высоте тента и максимальной безразмерной температуре.

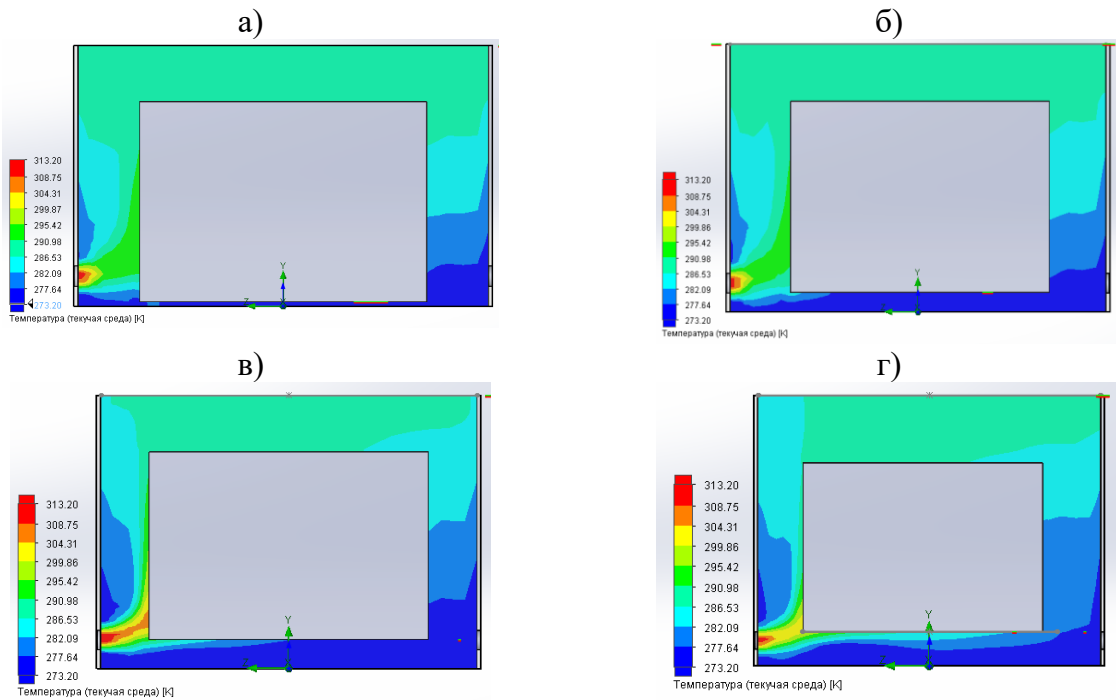


Рисунок 6 - Картины распределения температур внутри шатрового укрытия при средней высоте шатра и максимальной безразмерной температуре для зазоров: а - 0,2 м; б - 1,0 м; в - 1,5 м; г - 2,0 м

Анализируя Рисунок 6 можно сделать выводы, что чем больше зазор, тем интенсивнее прогревается нижняя грань сохнущей детали. Оптимальным зазором при прочих условиях будет зазор 1,5 м.

В результате обобщения результатов расчетов было получено критериальное уравнение с множеством влияющих величин:

$$\Theta = \Theta' \cdot (0,0003 \cdot Ra^{2/3} + 0,41 \cdot Ra^{1/3} + 3,2) \cdot (((0,98 \cdot \frac{H}{e} - 4) \cdot 10^{-16}) \cdot Re^3 - (0,12 \cdot \frac{H}{e} - 0,3) \cdot 10^{-9}) \cdot Re^2 + (((-54 \cdot \Theta'^2 + 64 \cdot \Theta' - (16 \cdot \Theta'^2 - 20 \cdot \Theta' + 6)) \cdot \frac{H}{e} + 0,5) \cdot 10^{-4}) \cdot Re + 6,6) \cdot 10^{-9}, \quad (5)$$

где $\Theta' = (t_{вн} - t_{н}) / (t_{кал} - t_{н})$ – безразмерный коэффициент; e – зазор между полом шатра и окрашенной деталью, м; $t_{вн}$, $t_{н}$ – температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно, °C.

Целью экспериментальных исследований является проверка адекватности численной модели. Для этого был проведён констатирующий эксперимент. Проверка достоверности результатов производится сопоставлением результатов решения с имеющимися результатами натурных замеров при идентичных граничных условиях.

Экспериментальная установка представлена на Рисунке 7.

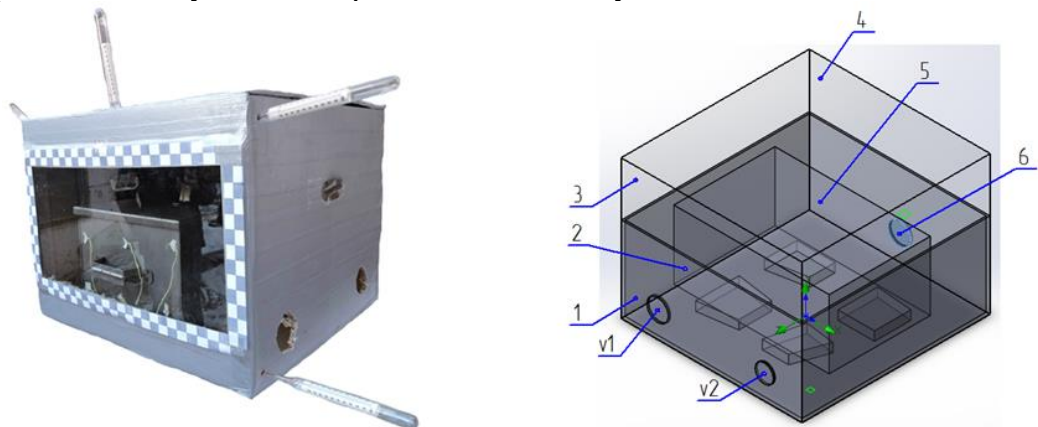
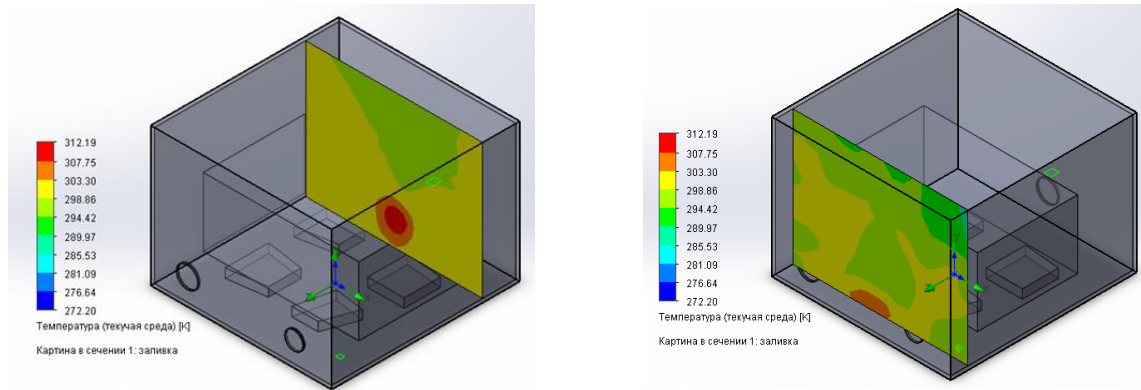


Рисунок 7 - Экспериментальная установка

В процессе эксперимента измерялись температуры воздуха внутри конструкции (точки 1, 3-5) с помощью термометров, скорость воздуха вентилятора (точка 6) и в вытяжных отверстиях (точки v1 и v2) анемометром, а также температура поверхности металлической конструкции части судна в точке 2 с помощью пирометра. Замеры проводились для шести режимов, в которых изменялись скорость и мощность тепловентилятора. Температура наружного воздуха $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На Рисунке 8 приведены картины распределения температур воздуха при натуральных условиях.



а) около приточного отверстия

б) около вытяжных отверстий

Рисунок 8 - Распределение температур воздуха при натуральных условиях

На Рисунке 9 показаны изменения температур нижней и верхней кромок окрашенной детали при температуре наружного воздуха $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

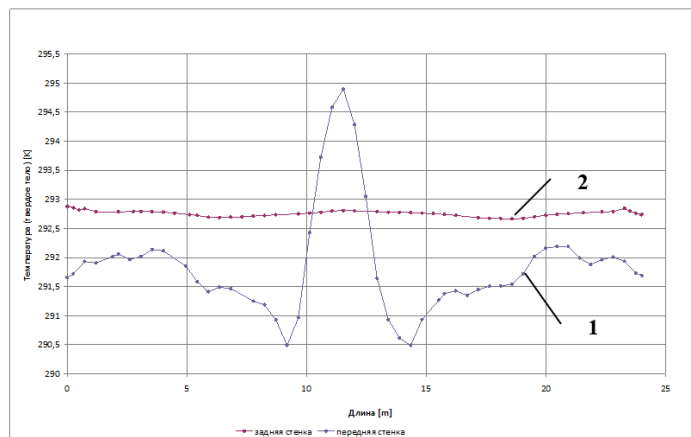


Рисунок 9 - Изменение температур нижней (1) и верхней (2) кромок окрашенной детали при температуре наружного воздуха $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Физическая картина процессов теплообмена при нагревании воздуха внутри укрытия в лабораторных условиях соответствует расчетным показателям распределения температур. Экспериментальная проверка полученных зависимостей показала сходимость результатов расчётов с измеренными значениями температур. Максимальное отклонение температуры в контрольных точках не превысило 15% от разности температур на выходе из калорифера и окружающей среды, что составило в абсолютном выражении для экспериментальной установки $6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В четвертой главе обосновано конструктивно-технологическое решение сушильной камеры тентового типа и систем воздушного подогрева. Предложена методика расчёта параметров калориферов сушильной камеры.

Для оперативного управления технологическим процессом разработан алгоритм, функционирование которого осуществляется по этапам, представленным на Рисунке 10.

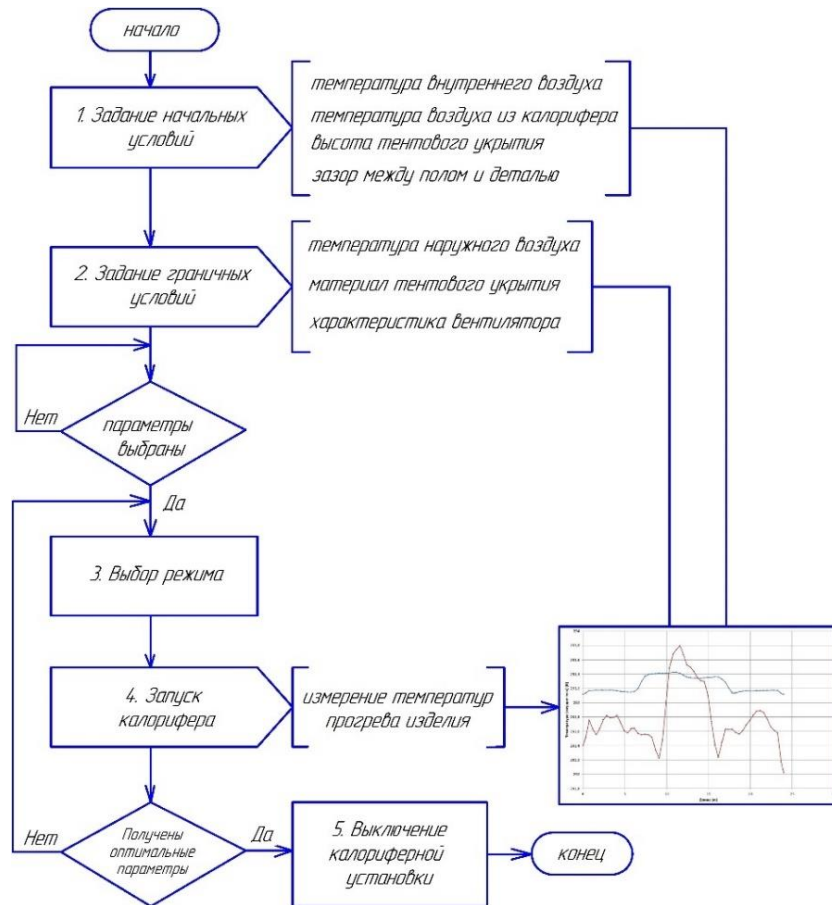


Рисунок 10 – Алгоритм расчёта параметров калориферов сушильной камеры

В соответствии с данным алгоритмом расчёта была разработана программа ЭВМ, позволяющая определять понижение температуры воздуха внутри камеры относительно температуры воздуха на выходе из калорифера, а также минимальную температуру воздуха.

Анализ выявленных закономерностей позволил предложить энергосберегающее решение для конструкции тентового укрытия для сушки окрашенных металлических конструкций и производства в условиях отрицательных температур наружного воздуха, предназначенного для защиты площадки от прямых солнечных лучей, атмосферных осадков и ветра, позволяющее утилизировать тепло внутреннего воздуха в зимний период года. По данному решению получен патент.

Применение в конструкции тентового укрытия энергосберегающей стенки позволяет увеличить температуру поступающего в калорифер холодного воздуха в среднем на 4-5 °С, при этом нагреваемый его воздух охлаждается на 2-4 °С. Это позволяет сократить мощность калорифера примерно на 25% и сэкономить в среднем 50000 руб. за 10 недель использования сушильной камеры в холодное время года.

Заключение

1. Определены существенные особенности процессов тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для передачи и потребления теплоты и определяющие режимные параметры систем вентиляции и отопления тентовых укрытий для сушки крупногабаритных металлических конструкций с целью улучшения их технико-экономических характеристик и экономии энергетических ресурсов.

2. Теоретически и экспериментально исследованы режимы работы энерготехнологической системы теплоснабжения сушильной камеры тентового типа на монтажной площадке. Разработана и реализована численная модель оптимизации системы теплоснабжения при сушке металлических окрашенных деталей в зимний период с учетом климатических и технологических

особенностей сушки. Использование численной модели позволяет решить задачу подбора калориферов для временного укрытия тентового типа с обеспечением требуемых параметров поверхности детали, обеспечивая качество изготовления крупногабаритных металлических конструкций. Проверена адекватность численной модели с помощью констатирующего эксперимента.

3. Обобщены результаты исследований и получено критериальное уравнение для расчета неравномерности температурного поля на поверхности изделия при различных граничных условиях.

4. Созданы методика расчета, технология и алгоритм, оптимизирующие подбор тепловентиляторов при различных температурах наружного воздуха и конструктивных размерах тентового укрытия. Предложено энергосберегающее тентовое укрытие, позволяющее снизить энергозатраты по сравнению с расходом энергии существующих укрытий до 25%.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, включенных в список ВАК

1. **Просвирина, И.С.** Повышение энергоэффективности тентового укрытия для окрашивания и сушки крупногабаритных металлоконструкций / И.С. Просвирина // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2022. - № 2. - С. 37-41.

2. **Яковлев, П.В.** Исследование температурных режимов в сушильных камерах тентового типа / П.В. Яковлев, И.С. Просвирина // Журнал С.О.К. - 2022. - № 4. – С. 28-31.

3. **Просвирина И.С.** Исследование параметров воздуха при сушке крупноблочных металлических конструкций в сушильной камере тентового типа / И.С. Просвирина, П.В. Яковлев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2023. - № 2. - С. 13-18.

4. **Просвирина, И.С.** Теоретическое и экспериментальное исследование параметров воздуха в сушильной камере тентового типа / И.С. Просвирина, П.В. Яковлев // Промышленная энергетика. - 2024. - №12. – С. 36-42.

5. **Яковлев, П.В.** Сравнительное исследование технологических схем воздушного обогрева и удаления воздуха внутришатрового укрытия / П.В. Яковлев, И.С. Просвирина // Научный журнал. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. Астрахань: Издательство «АГТУ», - 2017. - №3. – С. 34-39.

6. **Яковлев, П.В.** Численное моделирование температурных полей в шатровом укрытии для сушки судовых корпусных деталей / П.В. Яковлев, И.С. Просвирина // Научный журнал. Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. С.-Пб.: Издательство «ГУМРФ». - 2017. – Т.9. №3. – С. 597-602.

7. **Просвирина, И.С.** Исследование температурных полей учебного помещения / И.С. Просвирина // Научный журнал. Вестник Череповецкого государственного университета. Череповец: Издательство «ЧГУ». - 2016. - №3 (72). - С.21-24.

8. **Просвирина, И.С.** Контроль параметров сушки окрашенных металлических судовых деталей / И.С. Просвирина, А.Ю. Богданова, В.С. Коровин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. - 2017. - № 3 (21). - С. 44-49.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, включенных в список Web of Science

9. **Yakovlev P.** Temperature regime of painted parts in awning-type drying chambers at low ambient temperatures / P. Yakovlev, I. Prosvirina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. - № 2131 (2021) 052074. - doi:10.1088/1742-6596/2131/5/052074

Статьи в прочих изданиях

10. Энергосберегающее шатровое укрытие: пат. 201290 Рос. Федерация, № 2020121684; заявл. 25.06.2020; опубл. 08.12.2020, Бюл. № 34.

11. Определение параметров воздуха в сушильной камере шатрового типа. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021615817 Рос. Федерации, № 2021612355; заявл. 24.02.2021; опубл. 13.04.2021.

12. **Просвирина, И.С.** Экологические аспекты применения шатрового укрытия при сушке окрашенной части судна / И.С. Просвирина // «Экология и нефтегазовый комплекс»: Сборник материалов Международной научно-практической конференции. - Атырау: Атырауский университет нефти и газа. - 2018. - С. 157-161.

13. **Просвирина, И.С.** Энергосберегающая воздушная система отопления при окрашивании и сушки корпусных деталей судов в холодный период года / И.С. Просвирина // В сборнике: Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования. Материалы IV Национальной научно-практической конференции. Под общей редакцией Т.В. Золиной. Астрахань. - 2021. - С. 223-225.

14. **Просвирина, И.С.** Применение шатрового укрытия при сушке окрашенного модуля судна / И.С. Просвирина // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика». Уфа. - 2021. - С. 13-19.

15. **Просвирина, И.С.** Разработка алгоритма получения требуемой температуры поверхности окрашенной металлической конструкции / И.С. Просвирина // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VIII Международной научной конференции (Донецк, 25–27 октября 2023 г.). – Том 2: Физические, технические и компьютерные науки. Донецк. - 2023. – С. 155-157.

16. **Просвирина, И.С.** Энергосберегающие технологии сушки в укрытиях тентового типа / И.С. Просвирина, П.М. Палатов // В сборнике: Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования. Материалы VII Национальной научно-практической конференции с международным участием, приуроченной ко Дню российской науки. - 2024. - С. 164-168.