

На правах рукописи



ПТАХИН Антон Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ
ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ И СУХИХ ГРАДИРЕН
ПАРОВЫХ ТУРБИН**

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калуга-2019

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон» и в КФ МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мильтман Олег Ошеревич

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Жинов Андрей Александрович

Официальные оппоненты: **Рогалев Андрей Николаевич**,
доктор технических наук, доцент, ПАО «Силовые машины», начальник управления внедрения инноваций, перспективных и нишевых продуктов

Дмитриев Сергей Сергеевич,
Кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, заместитель заведующего кафедрой по научной работе кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева

Ведущая организация: Уральский энергетический институт ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «27» июня 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 222.001.01 при Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО «ВТИ» и на сайте:
<http://vti.ru/activities/dissertation-council/informaciya-o-zawite-dissertacij/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

*Рябов
Георгий
Александрович*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Паротурбинные установки с сухими градирнями и воздушными конденсаторами получают все большее распространение в мировой и отечественной энергетике на фоне роста стоимости водопотребления и ужесточения экологических требований. За последние 20 лет спрос на такие системы на мировом рынке вырос более чем в 20 раз. Помимо нехватки воды и роста цен на водопотребление существуют и другие причины, способствующие выбору систем сухого охлаждения: ограничения на потребление воды и повышение ее температуры в реках и водоёмах; большая свобода в выборе места расположения станции.

В настоящее время воздушно-конденсационные установки (ВКУ) и сухие градирни (СГ) применяются для паровых турбин и в парогазовых установках. В России единичная мощность ПГУ, введенных в эксплуатацию, составляет 40–800 МВт, большая часть из них оборудована сухими градирнями и воздушными конденсаторами.

Одним из важнейших направлений технического совершенствования ВКУ и СГ является повышение их надежности и эффективности. При эксплуатации этих аппаратов в условиях отрицательных температур возникает риск образования ледяных пробок и разрушения отдельных труб. Работа ВКУ и СГ при переменных режимах, особенно в области низких наружных температур, исследована недостаточно. Это особенно важно в условиях Сибири и Крайнего Севера.

Таким образом, вопросы расчета, проектирования и эксплуатации ВКУ и СГ в климатических условиях России и стран СНГ, исследование их характеристик при различных условиях функционирования и на переменных режимах исключительно актуальны.

Степень разработанности темы. Степень разработанности темы диссертации определяется совокупностью следующих компонентов:

- анализом публикаций и патентных разработок по теме диссертации;
- обоснованностью поставленной цели и задачи исследований, которая вытекает из проведенного анализа и опыта испытаний и обследований ВКУ и сухих градирен;
- проведенными исследованиями переменных и пусковых режимов работы на лабораторных установках и натурных образцах ВКУ и сухих градирен;

- обобщением результатов исследований на основе разработанной методики приведения экспериментальных данных к заданным условиям работы;
- разработкой рекомендаций по использованию результатов исследований в практике проектирования и эксплуатации паротурбинных установок (ПТУ) с ВКУ и СГ.

Цель и задачи работы. Объектом диссертационного исследования являются воздушно-конденсационная установка и сухие градирни паротурбинных установок ТЭС.

Предметом исследования являются свойства и конструкционные особенности ВКУ и СГ при различных условиях функционирования.

Целью работы является получение закономерностей, характерных для работы воздушных конденсаторов и сухих градирен ПТУ на переменных режимах, в том числе в условиях низких температур, для определения показателей их эффективности, разработки методики расчетов и повышения надежности эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе решены следующие задачи:

- получены новые данные о полях температур и скорости прогрева при термографировании поверхности теплообменных труб макетов воздушных конденсаторов и сухих градирен при различных способах подачи греющей среды, включая переходные процессы;
- получены новые данные при термографировании теплообменных поверхностей воздушного конденсатора со стороны входа охлаждающего воздуха, в том числе определены зависимости размеров зоны неэффективной работы от присоса воздуха в вакуумную систему ВКУ;
- получены новые данные о зависимости коэффициентов теплопередачи и давлений конденсации ВКУ от тепловой нагрузки и расхода охлаждающего воздуха;
- разработана методика расчёта переменных режимов работы конденсаторов и выполнен анализ ее пригодности для расчёта переменных режимов ВКУ;
- обеспечен надежный пуск и функционирование воздушного конденсатора и сухой градирни при отрицательных температурах охлаждающего воздуха.

Научная новизна работы:

- впервые получены экспериментальные данные по динамике прогрева и охлаждения макетов и натурной секции воздушно-конденсационных установок при низких температурах наружного воздуха;
- разработаны физическая и математические модели процессов прогрева и охлаждения, обеспечивающие обобщение результатов экспериментов при прогреве и пуске воздушно-конденсационных установок и сухих градирен;
- доработана методика расчета переменных режимов ВКУ для использования её в области частичных тепловых нагрузок;
- впервые получены экспериментальные данные по работе сухой градирни в условиях «теплой камеры». «Теплая камера» - режим работы сухой градирни при отрицательных температурах воздуха, когда поверхность теплообмена отделяется жалюзийными устройствами от окружающей среды и ее охлаждение осуществляется через ограждающие поверхности, при этом отсутствует тепловая нагрузка, а оборотная вода не дренируется.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработанная в диссертации методика расчета переменных режимов ВКУ позволяет выполнить оценку эффективности работы этих аппаратов в широком диапазоне нагрузок;
- проведенные исследования обеспечивают возможность безопасного пуска воздушных конденсаторов и сухих градирен в условиях низких температур наружного воздуха, характерных для тепловых электростанций России;
- определены минимально допустимые нагрузки, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию ВКУ и сухих градирен в зимних условиях.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментальные данные по динамике прогрева и охлаждения макетов и натурной секции ВКУ в сочетании с методикой приведения результатов экспериментов по прогреву и охлаждению ВКУ и СГ к расчетным условиям;
- рекомендации по безопасному пуску и эксплуатации ВКУ и сухих градирен в условиях низких температур охлаждающего воздуха, включая

методику оценки минимально допустимых тепловых нагрузок при экстремально низких температурах;

- результаты исследования переменных режимов воздушно-конденсационных установок и методика их расчёта в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок и условий охлаждения.

Достоверность результатов исследований подтверждаются следующими положениями:

- разработанные методики исследований реализованы с помощью приборов, поверенных в центре стандартизации и метрологии;
- хорошей сходимостью тепловых и материальных балансов;
- широким обсуждением результатов испытаний на конференциях и семинарах.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- на XVIII Школа-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В НОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ». 23-27 мая 2011 г. в г. Звенигород, Россия;

- на XIX Школа-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ». 20-24 мая 2013 г. в г. Орехово-Зуево, Россия;

- на шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6). 27-31 октября 2014 г., г. Москва;

- на XX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ». 25-29 мая 2015 г., г. Звенигород, Россия. Диплом первой степени за доклад по теме «Комбинированный прогрев паром теплообменных модулей воздушных конденсаторов при необходимости пуска в зимних условиях. — Рег. № 033»;

- на научно-практической конференции «ЭНЕРГЕТИКА – ЭКОЛОГИЯ – ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ» к 25-летию образования ЗАО НПВП «Турбокон» 16-18 мая 2016 г., г. Калуга;

- на Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 19-25 сентября 2016 г. г. Ялта;

- на XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ» 22–26 мая 2017 г., г. Санкт-Петербург;

- на седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7). 22-26 октября 2018 г., г. Москва.

Публикации. Основные положения и выводы изложены в 12 печатных работах, среди которых 8 публикаций в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка из 104 наименований. Весь материал изложен на 156 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе представлен обзор применения и конструкций ВКУ и СГ, используемых в современной энергетике. Описаны методы расчета переменных режимов работы конденсаторов паровых турбин и проблемы пуска и работы СГ и ВКУ в различных условиях.

Особенность ВКУ по сравнению с поверхностными водоохлаждаемыми конденсаторами (КП) определяется тем, что их общая оребренная поверхность теплообмена на три порядка больше; объём вакуумной системы ВКУ в $6\div 10$ раз больше; коэффициент теплопередачи ВКУ на два порядка, а приведенный к поверхности конденсации – в $5\div 10$ раз меньше, чем у КП.

В настоящее время воздушно-конденсационные установки и сухие градирни применяют в электроэнергетике в качестве конденсаторов водяного пара турбоустановок, а также на газокompрессорных станциях для охлаждения масла, а также в кондиционерах и калориферах различного типа и назначения.

Изготовителями ВКУ в России являются: ОАО «Калужский турбинный завод», поставивший четыре воздушных конденсатора для паровых турбин малой и средней мощности, ОАО «Борисоглебский завод химического машиностроения», ПАО «Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск».

Одним из важнейших направлений технического совершенствования ВКУ является повышение надежности при эксплуатации и пуске, особенно в условиях низких температур. Анализ литературных источников показал, что основными причинами аварийных ситуаций при работе аппаратов воздушного охлаждения, применяемых в настоящее время в энергетике, являются замерзание жидкости и разрыв труб, а также разрушение вентиляторов при пуске под воздействием вибрации, возникающей из-за стекания и замерзания воды на лопастях. При эксплуатации ВКУ в условиях отрицательных температур возникает риск намораживания конденсирующегося пара на внутреннюю поверхность теплообменных труб. Следствием этого может быть образование ледяных пробок и разрушение отдельных труб. Опасность образования ледяных пробок возрастает в застойных зонах, где конденсация пара в основном завершена, коэффициент теплоотдачи со стороны конденсирующегося пара уменьшается, и температура трубы на границе с пленкой конденсата становится отрицательной.

В главе выполнен сравнительный анализ расчетов тепловой эффективности градирни по схеме Геллера и поверхностного конденсатора. Показано, что для схемы Геллера требуется на 20–47% большая площадь поверхности теплообмена, чем при прямой конденсации пара внутри труб ВКУ.

Подчеркнуто, что работа ВКУ и СГ при переменных режимах, особенно в области низких наружных температур, исследована недостаточно.

Необходимы разработки, обеспечивающие рост надежности и эффективности этих устройств.

Отмечается, что в отечественной энергетике накоплен определенный опыт эксплуатации, позволяющий оценить достоинства и выявить недостатки установок, использующих технологии сухого охлаждения. Комбинация СГ с поверхностным конденсатором оказывается самой дорогой по уровню капитальных затрат и представляется менее перспективной, чем прямая конденсация пара в ВКУ.

Значительная часть первой главы посвящена анализу методик расчета конденсаторов паровых турбин. Используемые в настоящее время формулы для расчета коэффициента теплопередачи водоохлаждаемых конденсаторов получены на основании обобщения опыта испытаний и эксплуатации конденсационных установок.

Приведены графики для определения коэффициента теплопередачи в одно- и двухходовом конденсаторах и проанализированы используемые различными авторами зависимости для коэффициентов теплопередачи, учитывающие тепловую нагрузку, свойства материала, размеры труб и их геометрию, чистоту поверхности конденсатора, концентрацию воздуха в паре. Рассмотрены факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи и их роль при переменных режимах. Сделан вывод о том, что существующие методы расчета номинального и переменного режима водяных конденсаторов применительно к ВКУ требуют существенной корректировки.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов прогрева и пуска макетов воздушных конденсаторов при различных способах подачи греющей среды: внутренний и внешний разогрев, горячий воздух, разогретый пар. Экспериментальные исследования различных вариантов системы прогрева выполнялись на макетах воздушных конденсаторов, установленных в межведомственной научно-исследовательской лаборатории имени В.А. Федорова ЗАО НПВП «Турбокон» (Рисунок 1).



Рис. 1. Экспериментальный стенд макетов воздушного конденсатора

Источниками тепла при внешнем разогреве на разных этапах испытаний служили (табл. 1):

- тепловая пушка ERGUS QE-10D мощностью 10 кВт, генерирующая горячий воздух;
- установка «Гейзер-200», генерирующая пар с расходом до 94 кг/ч.

Источниками тепла при внутреннем разогреве на разных этапах испытаний служили: компрессор U-55, подающий сжатый воздух с расходом до 0,1 кг/с; установка «Гейзер-200».

Всего проведено четыре опыта, особенности которых представлены в Таблице 1.

Сравнивались следующие показатели:

- 1) значение относительного прогрева металла теплообменника – разности конечной температуры в установившемся режиме и начальной температуры – для места измерения, где этот прогрев максимален, и для места, где он минимален;
- 2) время достижения теплового состояния, при котором температура на 5 °С меньше, чем максимальная;
- 3) время снижения температурной разности Δt_m до половины ее максимального значения (остывания после завершения прогрева);
- 4) равномерность прогрева теплообменной (ТО) поверхности.

Таблица 1. Условия опытов при разных способах прогрева ВКУ

№	Источник тепла	Теплоноситель	Направление подвода греющей среды
1	Компрессор U-55	Сжатый воздух с температурой 60-65 °С	Внутрь теплообменной (ТО) поверхности
2	Нагреватель воздуха ERGUS QE-10D на дизельном топливе мощностью 10 кВт	Воздух	Снаружи ТО поверхности
3	Установка «Гейзер-200»	Пар с температурой 200 °С и давлением 0,5 МПа, расход пара 50 кг/ч.	Внутрь ТО поверхности
4	Установка «Гейзер-200»	Пар с температурой 200 °С и давлением 0,5 МПа, расход пара 110 кг/ч	Снаружи ТО поверхности

По результатам термографирования установлено, что при нагреве воздухом, подаваемым компрессором и/или тепловой пушкой как внутрь, так и снаружи теплообменного модуля, наблюдается значительная неравномерность нагрева теплообменных труб независимо от способа подачи.

Подача внешнего пара позволяет достаточно быстро прогреть макеты ВКУ при приемлемой, с разбросом $5\div 6$ °С, равномерности поля температур теплообменной поверхности и минимальных затратах греющего пара (рис. 2). Анализ и сравнение экспериментальных данных при различных способах прогрева позволили выбрать оптимальный вариант: внешнюю подачу пара на теплообменную поверхность и внутреннюю – в конденсатные линии и коллекторы по противоточной схеме.

Серия экспериментов по исследованию эффективности прогрева за счет внешнего подвода пара позволила не только экспериментально определить необходимые параметры системы прогрева, но и обеспечить равномерность температуры ТО при прогреве. На макетах ВКУ была проведена серия испытаний для обоснования рациональной конструкции устройства прогрева ТО.

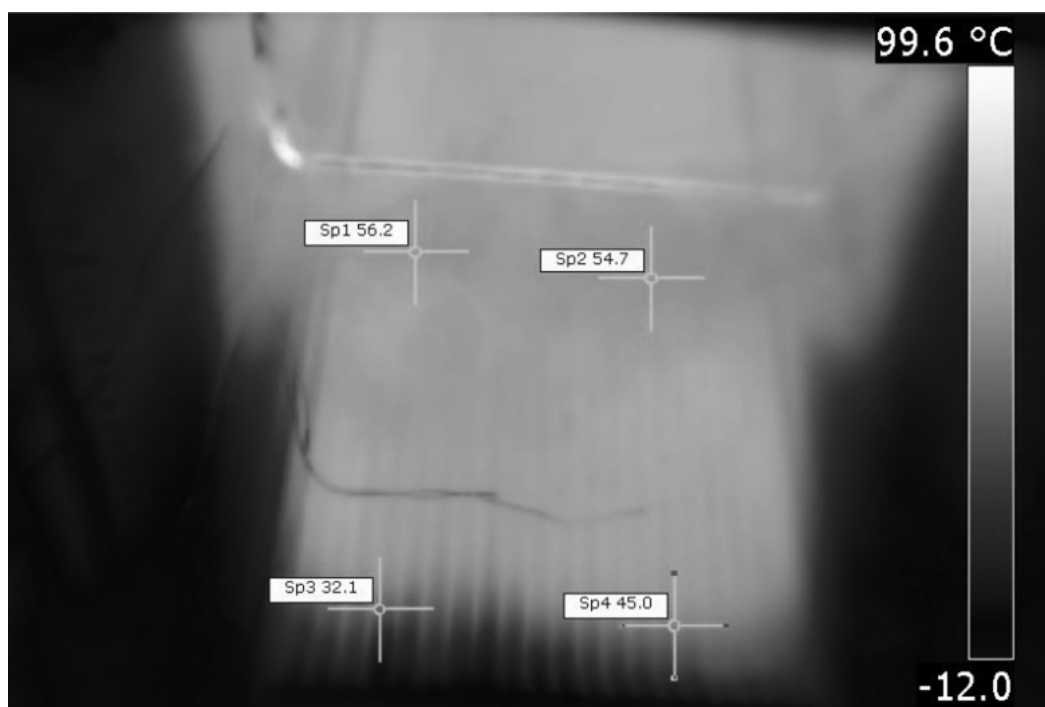


Рис. 2. Термограмма теплообменной поверхности со стороны входа охлаждающего воздуха в конце прогрева в течение 30 минут в опытах с внешней подачей пара на поверхность

На рис. 3 приведены графики прогрева и охлаждения металла поверхности теплообменника при температурах воздуха $T_{\text{в}} = +23^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{в}} = -6^{\circ}\text{C}$. Во время экспериментов варьировались следующие параметры: расход греющего пара; расстояние от коллектора греющего пара до ТО поверхности; угол наклона коллектора греющего пара к ТО поверхности при различной начальной температуре воздуха. Установлено, что при различных начальных температурах воздуха неравномерность температуры прогретого паром теплообменника уже через 20 минут становится менее 10°C . По мере дальнейшего прогрева различие температур продолжает уменьшаться: при прогреве в течение 30 минут оно становится менее 7°C и практически не зависит от начальной температуры воздуха. Характер зависимости температуры металлической поверхности от времени прогрева паром позволил предположить, что её измеряемая максимальная температура практически не зависит от начальной температуры воздуха при времени прогрева от 50 минут. Таким образом, показана возможность обеспечить необходимый прогрев труб паром при любых начальных температурах металла труб ВКУ.

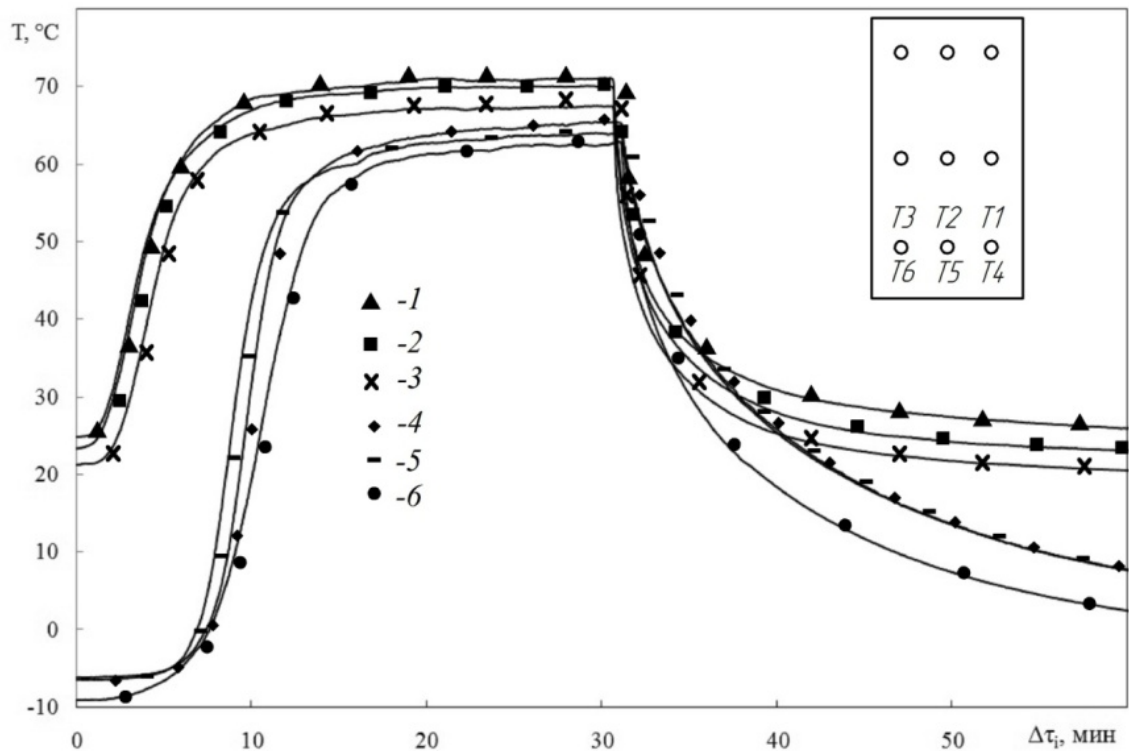


Рис. 3. Изменение температуры металла во времени, измеренное термопарами T_1 (1), T_2 (2), T_3 (3) при температуре воздуха $T_{\text{в}} = +23$ °C и термопарами T_4 (4), T_5 (5), T_6 (6) при температуре воздуха $T_{\text{в}} = -6$ °C

В третьей главе представлены результаты физического и математического моделирования процессов прогрева и охлаждения макетов воздушных конденсаторов для прогнозирования изменения температуры конструкции в других внешних условиях, в том числе при экстремально низких температурах.

При построении моделей были учтены следующие особенности процессов прогрева и охлаждения теплообменных модулей:

- все представленные во второй главе способы повышения температуры теплообменника, осуществлялись за счет подвода теплоты разными теплоносителями;
- часть подводимого тепла тратилась на прогрев металлоконструкций, не относящиеся к теплообменнику, с отводом тепла в дальнейшем в окружающую среду;
- при обдуве теплообменника извне воздухом от тепловой пушки стабильный тепловой поток обеспечивался постоянством расхода топлива работающей пушки;
- при прогреве паром и стабильной работе установки «Гейзер-200» тепловой поток, подводимый к теплообменнику, считался постоянным;

- температура металлической поверхности теплообменных модулей стабилизируется при равенстве подводимого к нагреваемой поверхности и отводимого в окружающую среду тепловых потоков.

С учетом перечисленных выше условий получено выражение, описывающее зависимость температуры нагреваемой конструкции от расхода тепла, приносимого извне теплоносителем, условий окружающей среды и времени нагрева:

$$\Delta t_{\text{м}} = \frac{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{pv}} \cdot \varepsilon \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{н}})}{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{pv}} \cdot \varepsilon + \alpha \cdot F} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{(G_{\text{в}} \cdot c_{\text{pv}} \cdot \varepsilon + \alpha \cdot F)}{c_{\text{м}} \cdot M_{\text{м}}} \cdot \tau}} \right) \quad (1)$$

где $\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{м}} - t_{\text{н}}$ – изменение температуры нагреваемого объекта $t_{\text{м}}$ относительно температуры окружающей среды $t_{\text{н}}$, °C за время τ , с; $G_{\text{в}}$ – расход воздуха в камеру входа холодного воздуха; c_{pv} – изобарная теплоемкость воздуха; F – площадь поверхности теплообмена с воздушной стороны, м²; α – коэффициент теплоотдачи от нагретой поверхности ТО в условиях свободной конвекции, Вт/м²К; ε – const; $c_{\text{м}} \cdot M_{\text{м}}$ – теплоемкость теплообменной части макета, кДж/К, $t_{\text{вх}}$ – температура окружающего воздуха.

После экспериментального определения параметров уравнения (1) его можно использовать для прогнозирования прогрева при других параметрах внешней среды, в частности при других температурных условиях. Экспериментальные зависимости $\Delta t_{\text{м}} = f(\tau)$, полученные при определенной температуре, могут быть использованы для этого же объекта при других температурах, если зависимость $Q_{\text{подв}} = f(\tau)$ не меняется. Этот вывод послужил основой методики пересчета параметров прогрева-охлаждения ВКУ, полученных при определенной атмосферной температуре, на другие температуры. На рис. 4 показана зависимость $t_{\text{м}} = f(\tau)$, экспериментально определенная при $t_{\text{н}} = +13$ °C и пересчитанная на экстремально низкую температуру атмосферного воздуха $t_{\text{н}} = -40$ °C.

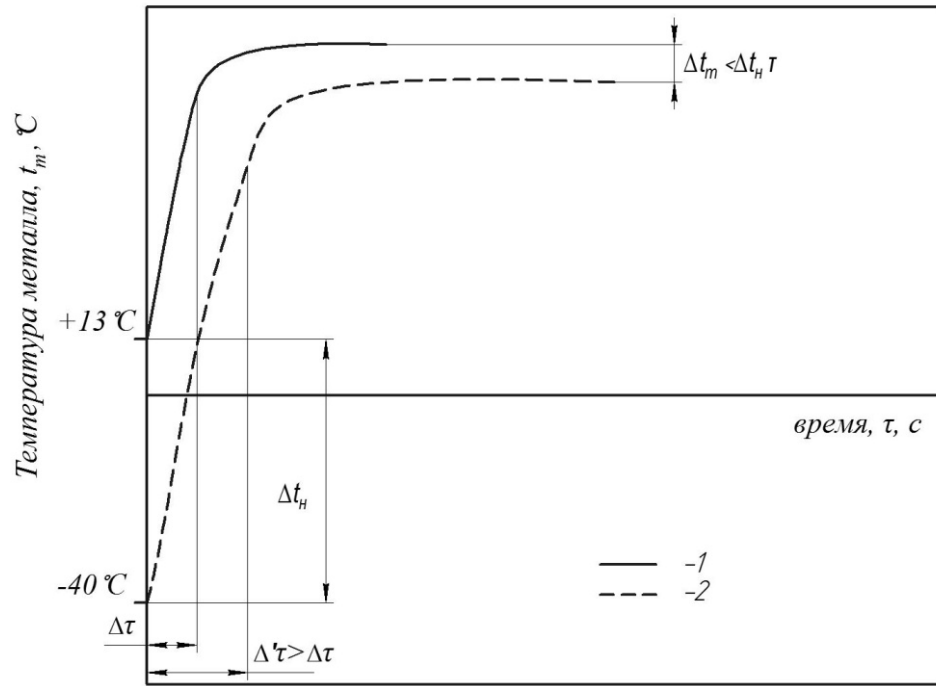


Рис. 4. Зависимость $t_m = f(\tau)$, 1 -полученная экспериментально при $t_n = +13$ °C; 2 - пересчитанная на $t_n = -40$ °C

В третьей главе предложено уравнение, описывающее динамику процесса охлаждения воздушного конденсатора после прекращения прогрева. Зависимость изменения температуры теплообменника от времени представлена в виде выражения:

$$\Delta t_m = t_m - t_n = t_{m0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha_0 \cdot F}{0,33 \cdot c_m \cdot M_m} \cdot \tau\right)^3} \quad (2)$$

где $\Delta t_m = t_m - t_n$ – изменение температуры нагреваемого объекта t_m относительно температуры окружающей среды t_n , °C за время τ , с; α_0 – коэффициент теплоотдачи от нагретой поверхности ТО в условиях свободной конвекции в момент прекращения прогрева, Вт/(м²·К); t_{m0} – температура металла в момент прекращения подачи греющей среды, °C; F – площадь поверхности теплообмена с воздушной стороны, м²; $c_m \cdot M_m$ – теплоемкость теплообменной части макета, кДж/К.

Корректность допущений, принятых при построении моделей, описывающих процессы нагрева и охлаждения теплообменников воздушных конденсаторов и в методике пересчета экспериментальных данных, полученных при одних температурных условиях, на другие была проверена экспериментально.

На рис. 5 представлены результаты измерений температуры в контрольных точках металла труб макета ВК при подаче воздуха от компрессора внутрь теплообменных труб при температуре наружного воздуха минус 5°C и минус 20°C. Здесь же представлены результаты пересчета данных, полученных при минус 5°C, на температуру минус 20°C. Приведенные результаты свидетельствуют о корректности разработанной методики пересчета.

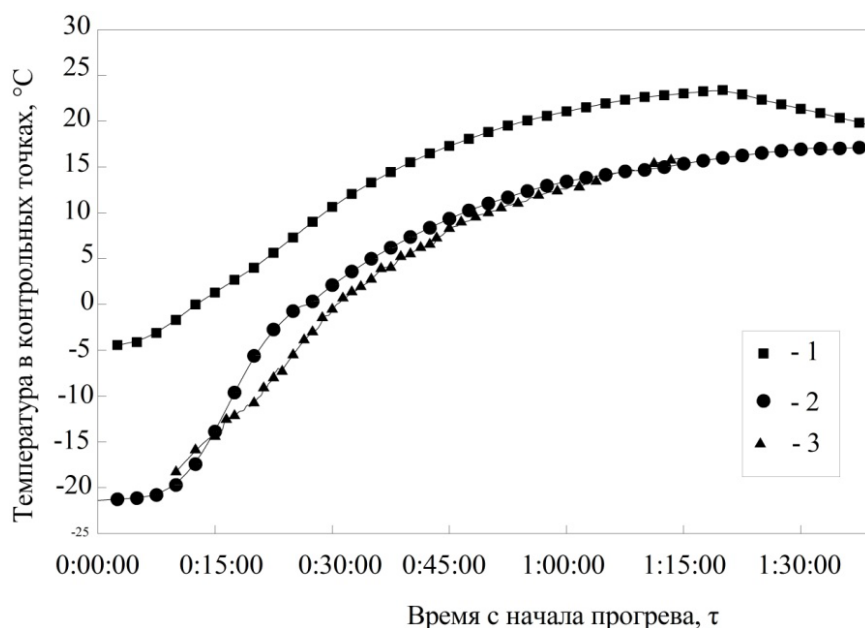


Рис. 5. Зависимость температуры в контрольной точке 1 от времени прогрева 1 и 2 – при температуре окружающего воздуха минус 5°C и минус 20 °C соответственно; 3 – пересчитанные с минус 5°C на минус 20°C

На рис. 6 представлены изменения температуры в одной из точек, где скорость её снижения была наиболее высокой. Здесь же приведены результаты расчета по формуле (2).

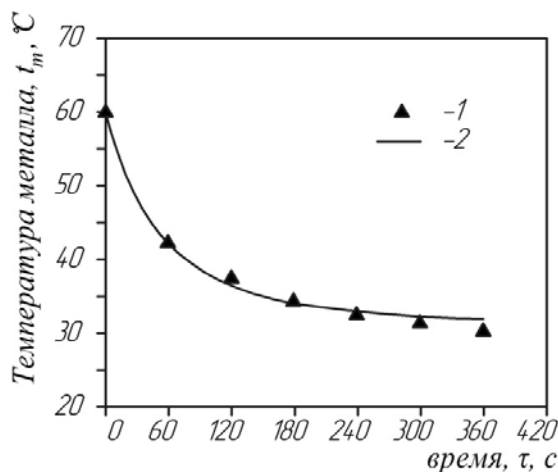
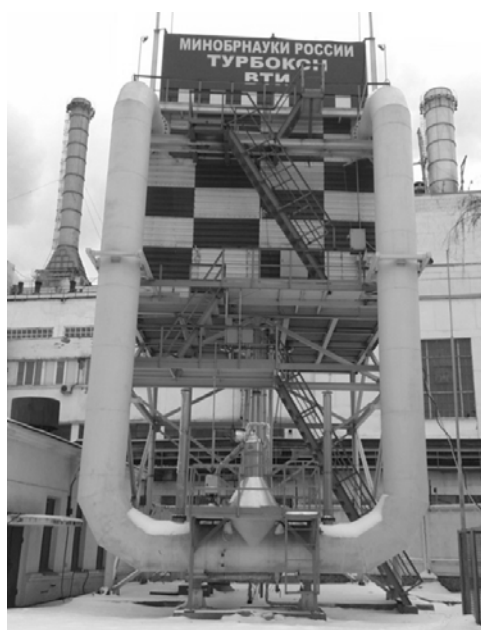


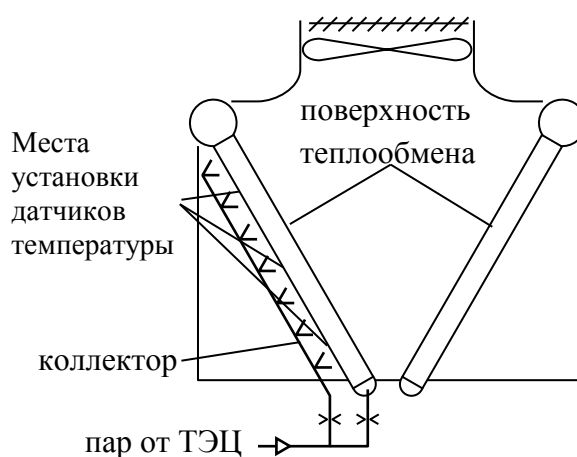
Рис. 6. Зависимость температуры поверхности ТО от времени после прекращения прогрева макета: 1 – результаты измерений; 2 – результаты расчета.

Найденная по формуле (2) температура теплообменной поверхности после прекращения прогрева, удовлетворительно согласуется с результатами измерений на макете ВКУ. Предложенная в диссертации методика пересчета позволяет распространить полученные при определенной температуре параметры прогрева-охлаждения ВКУ на другие атмосферные температуры и может быть рекомендована для использования при эксплуатации.

В четвертой главе представлены результаты применения разработанной методики прогрева теплообменных модулей ВК. С этой целью изготовлены системы пуска и остановки ВК из холодного состояния при отрицательных температурах охлаждающего воздуха и проведены испытания на натурной секции воздушного конденсатора (ЭСВК) в ОАО «ВТИ» (рис. 7, а).



а)



б)

Рис. 7. ЭСВК на площадке ОАО «ВТИ» (г. Москва) во время зимнего этапа испытаний при отрицательных температурах наружного воздуха (а) и схема подвода греющего пара (б)

Греющий пар от сетевой магистрали ТЭЦ ВТИ через специально спроектированный и смонтированный на ЭСВК паропровод подавался к раздающим коллекторам, смонтированным в камерах всасывания со стороны подвода охлаждающего воздуха к трубкам теплообменной поверхности (рис. 7, б). Конструкция коллекторов, количество и диаметр отверстий подачи пара на теплообменный модуль, диаметры подводящих паропроводов и дроссельных шайб, установленных для обеспечения равномерной раздачи пара по поверхности и высокой скорости прогрева, предварительно

рассчитывались и отрабатывались на макетах ВКУ. На основе проведенных расчетов и экспериментальной отработки был принят расход греющего пара порядка 2 т/ч суммарно на прогрев модулей снаружи и сливных коллекторов изнутри. Учитывая, что время прогрева составляет порядка 5 – 6 минут, количество пара на один прогрев для одной секции ВК не превышало 200 кг.

На рис. 8 показаны характерные графики изменения температуры при подаче пара на ВК и прогреве для различных точек теплообменной поверхности, полученные при испытаниях.

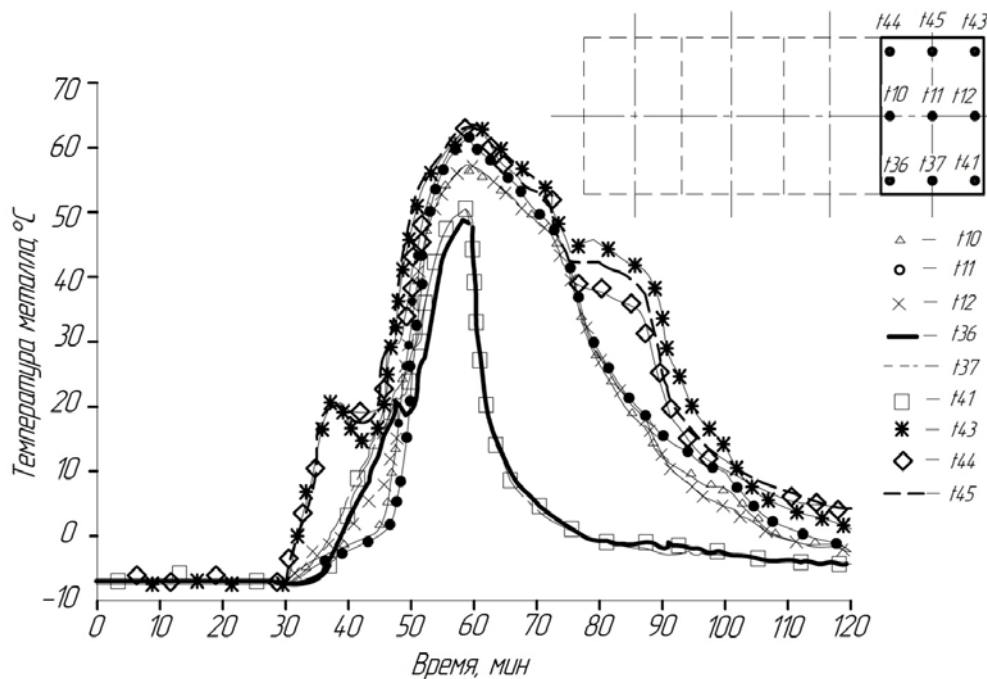


Рис. 8. Прогрев и остывание различных точек теплообменной поверхности с их расположением на ТО

В ходе испытаний после прогрева была получена приемлемая с разбросом 10-12°C равномерность температуры как нижних коллекторов, так и теплообменных поверхностей. Сделан вывод о том, что пусковая система с подачей пара на ребренную поверхность теплообменников эффективна, проста по конструкции и обеспечивает прогрев поверхности теплообменников за 8÷10 мин. из холодного состояния до +40÷45 °С. При этом потеря пара составляет 400÷500 кг в расчете на одну секцию ВКУ с поверхности ~ 6000 м².

В результате, описанных в главе 4, исследований обеспечены надежные пуски и функционирование воздушных конденсаторов при отрицательных температурах охлаждающего воздуха.

В пятой главе представлены результаты исследования переменных режимов работы воздушно-конденсационной установки. Испытания секции на номинальном и переменных режимах работы были проведены на натурной секции ВКУ, расположенной на площадке Всероссийского теплотехнического института (рис. 7, а).

Проведены три цикла испытаний:

- переменные расходы воздуха $G_{\text{возд}} = \text{var}$ при постоянной тепловой нагрузке $Q = \text{const}$;
- переменные тепловые нагрузки $Q = \text{var}$ при постоянном расходе воздуха $G_{\text{возд}} = \text{const}$;
- подача дополнительного воздуха $G_{\text{д в пар}}$ при $G_{\text{возд}} = \text{const}$, $Q = \text{const}$.

Были также определены «нулевые точки», т.е. достижимое давление в ВКУ при отсутствии тепловой нагрузки и различных значениях температуры воды на входе в водоструйные эжекторы и вакуумный водокольцевой насос.

Зависимость коэффициентов теплопередачи ВКУ k от тепловой нагрузки приведена на рис. 9 при различных расходах охлаждающего воздуха. Можно констатировать, что при нагрузке в интервале $0.6 \div 1.0$ от номинального значения 5114 кВт величина k изменяется незначительно, что отличается от поверхностных конденсаторов с водяным охлаждением, у которых, по литературным данным, изменение k составило бы $\sim 10 \div 15\%$.

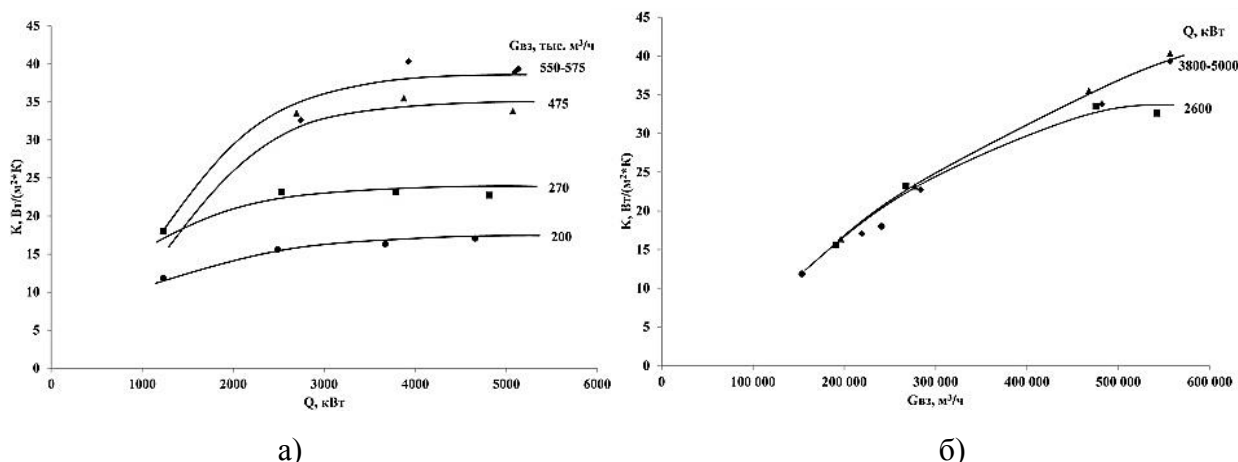


Рис. 9. Зависимость коэффициентов теплопередачи от тепловой нагрузки (а) и расхода охлаждающего воздуха (б)

Для успешной работы ВКУ необходима высокая герметичность большого объема их разветвленной вакуумной системы. Работе с имитацией присосов путем добавления в пар воздуха предшествовало

экспериментальное определение имеющихся присосов; они составили $0,053 - 0,10 \text{ м}^3/\text{ч}$, что несопоставимо меньше добавлявшегося в пар в эксперименте количества $\Delta G = 1 \div 6 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 10).

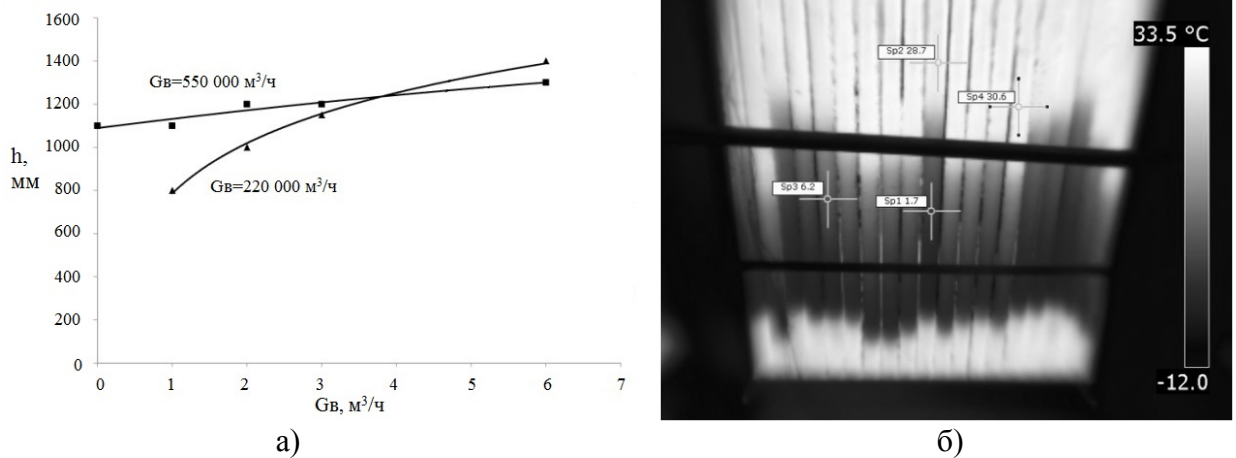


Рис. 10. Зависимость длины зон неэффективной работы ВКУ от присосов воздуха (а) и термограмма теплообменной поверхности со стороны входа охлаждающего воздуха (б)

Зоны неэффективной работы могут возникать из-за наличия в них остаточного воздуха, который сохранился в объеме ВКУ при наборе вакуума. При низких температурах охлаждающего воздуха устанавливается динамическое равновесие между незначительным поступлением воздуха с паром и диффузией его из зон неэффективной работы.

Испытания опытной натурной секции ВКУ на переменных режимах подтвердили высокую эффективность её работы: в расчетном режиме коэффициент теплопередачи составил $39 \div 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что значительно выше мировых аналогов.

На рис. 11 приведены характеристики натурной секции ВКУ при изменении тепловой нагрузки и различных расходах воздуха в пар от 1,3 до 7,7 кг/с.

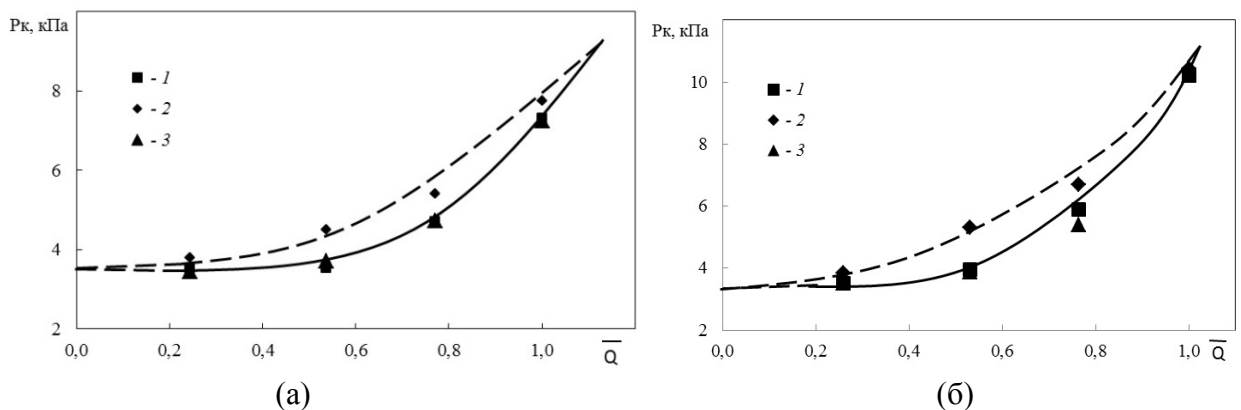


Рис. 11. Сопоставление экспериментальных и расчётных данных переменных режимов при $G_v = 550-575 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ (а) и $G_v = 465 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ (б): $\bar{Q}$ – относительная тепловая нагрузка; P_k – давление; $\blacklozenge$ – расчёт; $\blacksquare$ – эксперимент; $\blacktriangle$ – расчет по (3)

При снижении тепловой нагрузки в пределах $0,6 \div 1,0$ от номинальной коэффициент теплопередачи изменяется в пределах $5 \div 7$ %, что подтверждает рациональное распределение поверхности теплообмена между ходами конденсатора по пару.

Ввиду принципиального отличия конструкций и условий теплообмена методы расчета переменных режимов, используемые для водоохлаждаемых поверхностных конденсаторов, не применимы к ВКУ. Поэтому расчет переменных режимов велся с использованием номограммы О.О. Мильмана, которая опирается на экспериментальные значения давления и температуры при номинальной и нулевой тепловой нагрузке, при этом данные экспериментальных измерений на $0,5 \div 1$ кПа ниже расчетных.

В связи с этим введена поправка к относительной разности температур

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\Delta_p} \quad \text{в виде:}$$

$$\delta \bar{\Delta} = 0,3 \bar{Q} \bar{\Delta}_0 (1 - \bar{Q}) (2 - \bar{\Delta}_0), \quad (3)$$

где $\bar{Q}$ – относительная тепловая нагрузка,

$$\bar{\Delta}_0 = \frac{t_{s\min} - t_{B1}}{\Delta_p} \quad \text{– относительная минимальная разность температур,}$$

$\Delta_p = t_{sp} - t_{B1}$ – расчетная разность температур насыщения t_{sp} и воздуха t_{B1} на входе.

Расчетные значения P_k по (3) наложены на экспериментальный график $P=f(\Delta G)$ на рис. 11, здесь разница результатов расчета и эксперимента не превышает 0,3 кПа.

В шестой главе представлены результаты исследования тепловых режимов оборудования при работе сухой вентиляторной градирни.

При низких наружных температурах возникает опасность замерзания воды в трубах теплообменников ВКУ и СГ и, как следствие, их разрушения. При экстремально низких наружных температурах эти аппараты переводят в режим работы «теплой камеры». Цель исследований, представленных в шестой главе, заключается в оценке тепловых потоков и температуры элементов в этих условиях.

Объектом исследования выступала сухая вентиляторная градирня блока ПГУ-220Т на ТЭЦ-12 «Мосэнерго», состоящая из основной градирни DC-13000-52-38-110 и вспомогательной градирни DC-2500-52-7-110.

Теплотехнические характеристики СГ, полученные в результате испытаний сухой градирни в условиях «тёплой камеры», приведены в табл. 2. и на Рис. 12.

Таблица 2 – Теплотехнические характеристики основной градирни*

№	Дата/номер секции СГ	8.09/№11	9.09/№34	10.09/№34
1	Режим работы	Закрытые ЖУ	Паровой прогрев	Обычная работа
2	$t_{в1}, ^\circ\text{C}$	-4	-3,5	-3,0
3	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	30,8	28,0	33,2
4	$t_{w2}, ^\circ\text{C}$	28,8	26,2	29,6
5	$V_w, \text{м}^3/\text{ч}$	10038	10041	9960
6	$Q_w, \text{МВт}$	22,71	20,77	41,80
7	$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	1,32	1,33	2,32

* Здесь $t_{в1}$ – температура воздуха на входе СГ, и t_{w1} , t_{w2} – температуры воды на входе и выходе СГ, Q_w – тепловая мощность СГ, K – коэффициент теплопередачи, V_w – расход воды, отнесенный к поверхности теплообмена СГ.

Исследования тепловых режимов сухой градирни выявили зависимость температурного состояния ее элементов от тепловой нагрузки, расположения секций, температуры охлаждающего воздуха, направления и силы ветра и пр.

Одним из практически значимых результатов экспериментов является оценка теплосъёма СГ при низких температурах окружающего воздуха. Полученный по эксплуатационной базе данных график зависимости теплосъёма сухой градирни от разности температур воды t_{w1} и наружного воздуха $t_{в1}$ или от его температуры при температуре воды на входе 30°C , представлен на рис. 12.

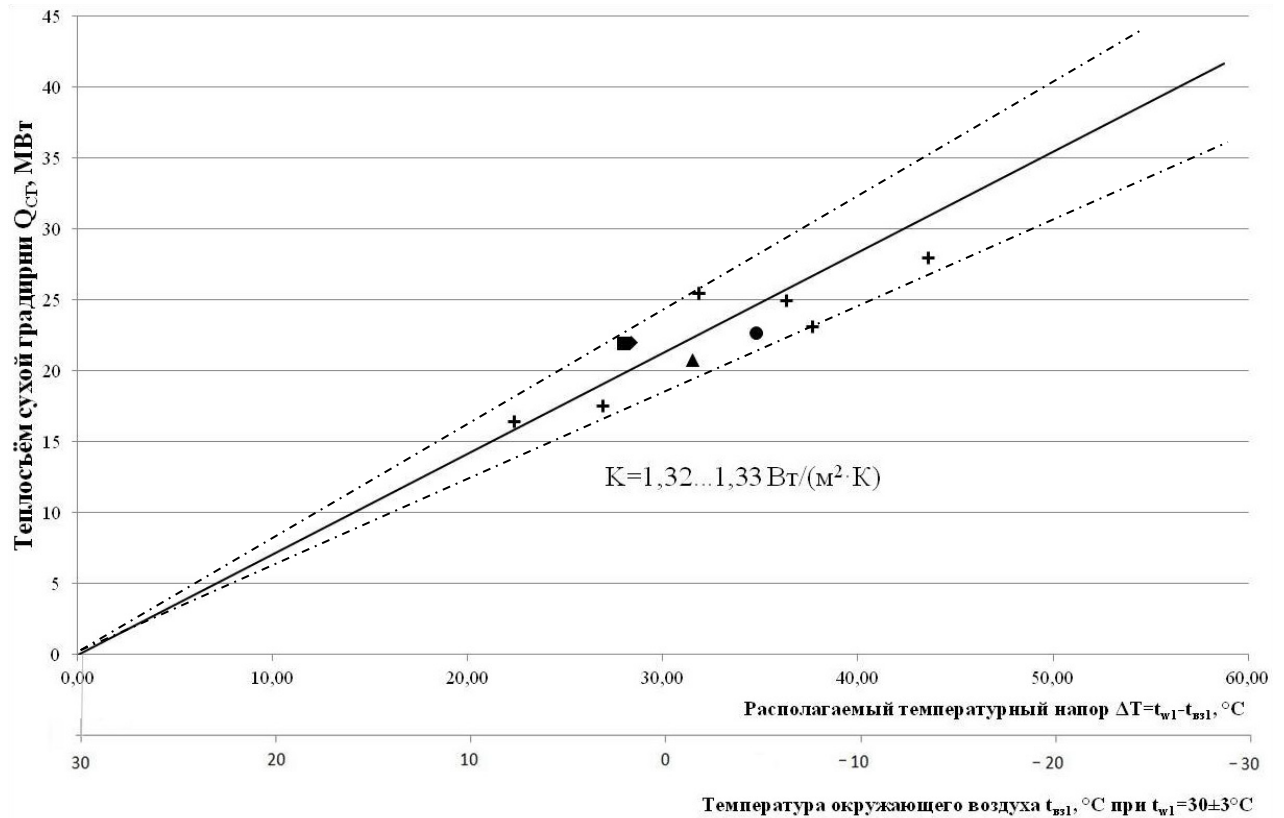


Рис. 12. График зависимости теплосъёма сухой градирни в режиме естественной циркуляции от располагаемого температурного напора/температуры окружающего воздуха при работе в режиме «тёплой камеры»

На основе ранее проведенных работ было спрогнозировано значение теплосъёма сухой градирни при поддержании температуры воды в теплообменной поверхности не ниже 20°C при минимальной температуре окружающего воздуха минус $27,5^\circ\text{C}$. При проведении всех мероприятий по предотвращению переохлаждения воды на сливе СГ: закрытии всех жалюзийных устройств (боковых, верхних и нижних) и отключении вентиляторов секций, - оно составило порядка 40 МВт. Соответствующее этим условиям значение коэффициента теплопередачи для теплового потока от поверхности теплообмена через ограждающие конструкции в окружающую среду составило $K = 1,33 \pm 0,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Полученные результаты дают возможность на стадии проектирования оценить значения минимального теплосъёма, допустимого для охлаждаемых воздухом поверхностей теплообмена СГ и ВКУ при низких наружных температурах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате исследования пусковых и переменных режимов макетов и натурных образцов воздушных конденсаторов и сухих градирен были получены следующие основные результаты:

1. Экспериментальные исследования процессов прогрева поверхностей теплообмена воздушных конденсаторов выполнены при различных видах и способах подачи греющей среды. Установлено, что при нагреве воздухом наблюдается значительная неравномерность температуры теплообменных труб, не обеспечивающая надежность пуска.

2. С использованием экспериментальных данных разработана физическая модель процессов прогрева и остывания макетов воздушных конденсаторов и расчетная методика прогнозирования параметров и скорости их нагрева и охлаждения конструкции при различных внешних условиях, в том числе при экстремально низких температурах.

3. На основе теоретического анализа и экспериментальной проверки выбраны, спроектированы и изготовлены элементы системы прогрева, обеспечивающие пуск, эксплуатацию и останов натурной секции воздушного конденсатора при отрицательных температурах воздуха.

4. Осуществить достаточно быстрый прогрев с равномерной температурой теплообменной поверхности позволяет внешняя подача пара, при этом разница температур металла в различных частях поверхности практически не зависит от начальной температуры воздуха и уже через 30 минут становится менее 10°C . Анализ и сравнение экспериментальных данных при различных способах прогрева позволил выбрать оптимальный вариант: внешняя подача пара на прогрев теплообменной поверхности и подача пара в конденсатные линии и коллекторы по противоточной схеме движения пар-конденсат.

5. Показано, что эффективность прогрева теплообменного модуля ВКУ определяется теплотой парообразования при его конденсации, температура греющего пара не имеет существенного значения, а необходимая скорость прогрева обеспечивается расходом пара.

На основе её предложена и успешно апробирована методика пересчета параметров прогрева-охлаждения ВКУ на другие температуры воздуха.

При их испытаниях на натурной секции ВКУ в течение 30 минут была получена приемлемая с разбросом до 10°C равномерность прогрева коллекторов и теплообменных поверхностей.

6. Испытания опытной натурной секции ВКУ с трехходовой схемой движения пара на переменных режимах подтвердили высокую эффективность её работы: в расчетном режиме коэффициент теплопередачи составил $39\div 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, что значительно выше мировых аналогов.

Благодаря рациональному распределению поверхности теплообмена между ходами конденсатора по пару при тепловых нагрузках в пределах $0,6\div 1,0$ от номинальной коэффициент теплопередачи изменяется в пределах $5\div 7 \%$.

7. Предложена применительно к ВКУ поправка к методике расчета переменных режимов. Расчет с использованием поправок, учитывающих влияние температуры охлаждающего воздуха, изменений тепловой нагрузки, присосов воздуха и характеристик воздухоудаляющих устройств, даёт удовлетворительные результаты.

8. При анализе работы сухой градирни показано, что локальный нагрев части секций приводит к перераспределению теплосъема в СВГ, которое повышает безопасность и надежность работы всей градирни.

9. При полностью закрытых жалюзи (режим «теплой камеры») значения коэффициента теплопередачи K равно $1,33\pm 0,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ для теплового потока от поверхностей теплообмена через ограждающие конструкции в окружающую среду. Это дает возможность на стадии проектирования оценить значения минимального теплосъема, допустимого для охлаждаемых воздухом поверхностей теплообмена СГ и ВКУ при низких наружных температурах.

10. В результате проведенных исследований решена имеющая важное значение для экономики страны научная технологическая задача обеспечения надежного функционирования воздушных конденсаторов и сухих градирен в широком диапазоне тепловых нагрузок и температур охлаждающего воздуха.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК

1. Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Колесников Н.В., Дунаев С.Н., Птахин А.В., Кондратьев А.В. Результаты экспериментальных исследований расходно-напорных характеристик вентилятора воздушного конденсатора паротурбинных установок (статья) // Вестник МЭИ. – 2013. – № 2. – С. 26-30.
2. Федоров В.А., Мильман О.О., Кондратьев А.В., Птахин А.В. Особенности конденсации пара внутри труб и каналов // Теплоэнергетика. – 2015. – № 4. – С.71-80.
3. Мильман О.О., Птахин А.В., Кондратьев А.В., Дунаев С.Н., Кирюхин А.В. Переменные режимы работы воздушно-конденсационной установки // Теплоэнергетика. – 2016г. – № 5. С.7-13; Milman O.O., Ptakhin A.V., Kondratev A.V., Dunaev S.N., Kirjukhin A.V. Varying Duty Operation of Air-Cooled Condenser Units // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63. – № 5. – pp.313-318.
4. Мильман О.О., Птахин А.В., Кондратьев А.В., Шифрин Б.А., Яньков Г.Г. Пуск воздушно-конденсационных установок и сухих градирен при отрицательных температурах охлаждающего воздуха // Теплоэнергетика. – 2016г. – № 5. С.24-30.
5. Milman O.O., Ptakhin A.V., Kondratev A.V., Shifrin B.A., Zhilin A.E. Increasing the efficiency of heat removal from air steam condensers // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – Vol. 8. – Issue 11. – November 2017. – pp. 1141-1149.

Другие публикации

1. Федоров В.А., Шифрин Б.А., Ананьев П.А., Дунаев С.Н., Птахин А.В., Кондратьев А.В. «Результаты экспериментальных исследований теплогидравлических процессов при конденсации перегретого пара внутри наклонной трубы» // Теплофизика высоких температур. – 2014г. – т. 52, №2. Fedorov V.A., Shifrin B.A., Milman O.O., Ananev P.A., Dunaev S.N., Ptakhin A.V., Kondratev A.V. «Results of Experimentes studies of themo -hydraulic Processes durins the condensation of superheated steam inside an inelined tubes». High Temperature. – 2014г. – V52, № 2.
2. Мильман О.О., Птахин А.В., Кондратьев А.В., Крылов В.С. Переменные и пусковые режимы работы воздушно-конденсационной установки // - Тезисы докладов (Ялта, Республика Крым, 19-25 сентября 2016 г.).
3. Milman O.O., Yankov G.G., Kondratev A.V., Ptakhin A.V., Krylov V.S. Korlyakova E.J., Zhilin A.E. Approximate estimation of the thermal resistance of the terms in the process of heat transfer through the finned wall // Journal of Physics: Conf. Series 891 - 2017г., 012137.
4. Мильман О.О., Крылов В.С., Птахин А.В., Кондратьев А.В., Яньков Г.Г. Высокоэффективный конденсатор пара из парогазовой смеси // Теплоэнергетика. – 2017г. – № 12. С.16-26. Milman O.O., Krylov V.S., Ptakhin A.V., Kondratev A.V., Yankov G.G. High-Efficiency Condenser of Steam from a Steam-Gas Mixture // Thermal Engineering 2017г. – Vol. 64. – № 12. – pp.874-883.

5. Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Птахин А.В., Жинов А.А., Карышев А.К., Шевелев Д.В. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркулярных воздушных конденсаторов паротурбинных установок // – Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2015г. – № 5 (104). С. 87-105.
6. Фёдоров В.А., Мильман О.О., Кирюхин А.В., Дунаев С.Н., Шифрин Б.А., Кондратьев А.В., Птахин А.В., Ананьев П.А., Калинин А.Ю., Лошкарёва Е.А. Разработка, изготовление и испытание типовой натурной секции высокоэффективного воздушного конденсатора // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015г. – № 6. С. 102-112.
7. Мильман О.О., Фёдоров В.А., Кондратьев А.В., Птахин А.В. Конденсация перегретого пара внутри труб при интенсивном охлаждении стенки // В сборнике: Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. – 2014г. – С. 742-747.

