

На правах рукописи



ИГЛИН Павел Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО
КОНТРОЛЯ КОНДЕНСАТОРА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА
ОСНОВЕ УТОЧНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
КИСЛОРОДОСОДЕРЖАНИЯ КОНДЕНСАТА**

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вятский государственный университет» на кафедре «Теплотехника и гидравлика»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

Шемпелев Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Барочкин Евгений Витальевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой тепловых электрических станций;

Култышев Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, ЗАО «Уральский турбинный завод» (г. Екатеринбург), главный конструктор

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»), г. Москва

Защита состоится 16 декабря 2016 г. в 14-00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=262209>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Целью энергетической стратегии России является создание инновационного и эффективного энергетического сектора. Одной из задач для достижения этой цели является комплексная модернизация и развитие источников энергоснабжения. Это может быть достигнуто или путем строительства новых объектов с применением современных технологий, или путем модернизации и корректировки режимов работы действующего оборудования ТЭС (тепловых электростанций). Конденсационная установка (КУ) – это важная подсистема паротурбинной установки (ПТУ) ТЭС. При понижении давления и температуры отработавшего пара в конденсаторе снижается количество теплоты, передаваемое холодному источнику, повышается мощность, вырабатываемая турбиной, и возрастает экономичность цикла в целом.

Кроме того, КУ отводится роль деаэрата первой ступени, то есть в процессе ее эксплуатации должно быть обеспечено установленное нормами содержание коррозионно-активных газов в конденсате, поступающем в тракт регенеративного подогрева турбоустановки. Превышение этих норм ведет к повышенной активности коррозионных процессов в тракте от конденсатора до деаэрата и выносу продуктов коррозии на теплообменные поверхности котлов.

Степень разработанности темы исследования. Разработки методик расчета кислородосодержания конденсата отражены в работах таких авторов как: Шемпелев А.Г., Гришук И.К., Промыслов А.А., Кирш А.К. и др. В работах указанных авторов были предложены расчетные зависимости для определения содержания кислорода в конденсате, но в большинстве случаев с невысокой точностью. Также в этих работах не рассматривался вопрос применения методик расчета для анализа эксплуатационных данных с целью выявления причин повышенного кислородосодержания.

Объект исследования: конденсационная установка паротурбинной установки ТЭС.

Цель диссертационной работы – совершенствование системы эксплуатационного контроля конденсатора паротурбинной установки на основе уточнения методики расчета кислородосодержания конденсата.

Для достижения цели в диссертационной работе **решены следующие задачи:**

1. Разработка уточненной физико-математической модели конденсатора, позволяющей получить его характеристики при конденсации паровоздушной смеси и чистого пара при переменных присосах воздуха в любом режиме работы турбоустановки.

2. Верификация уточненной физико-математической модели на базе экспериментальных данных, а также с помощью нормативных характеристик конденсаторов турбоустановок различных типов.

3. Разработка уточненной методики, позволяющей оценивать отдельное влияние на давление пара в конденсаторе величины присосов воздуха и загрязнения его трубной системы в любых реальных режимах работы ПТУ.

4. Разработка уточненной методики расчета для определения кислородосодержания конденсата на выходе из конденсатора паротурбинной установки. И проведение ее проверки на базе эксплуатационных данных ГРЭС и ТЭЦ.

5. Разработка методики определения наличия присосов воздуха под уровень конденсата, поступающего в конденсатор с постоянно действующими дренажами.

6. Предложение перечня мероприятий по повышению деаэрирующей способности конденсаторов теплофикационных ПТУ, рассмотрение технико-экономической целесообразности использования этих мероприятий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена уточненная методика поверочного расчета конденсатора, которая позволяет получить его характеристики при конденсации пара из паровоздушной смеси и при конденсации чистого пара для всех режимов его работы.

2. Разработана физико-математическая модель конденсатора на основе уточненной методики и проведена ее верификация с использованием экспериментальных данных, полученных на турбоустановках различных типов.

3. Выполнено сопоставление нормативных и расчетных характеристик конденсаторов различных типов. Предложен единый подход к построению нормативных характеристик с помощью разработанной физико-математической модели КУ ПТУ.

4. Предложена методика определения наличия присосов воздуха под уровень конденсата, основанная на сравнении фактического значения содержания кислорода в конденсате в напорной линии конденсатных насосов с расчетным значением этого содержания, полученного по фактическому переохлаждению конденсата на днище конденсатора.

5. Выявлено, что при нормативных присосах воздуха в вакуумную систему равновесное кислородосодержание конденсата на выходе из конденсатора, соответствующее нормам ПТЭ (20 мкг/кг), возможно только в режимах его работы при расходах пара в конденсатор больше граничных и температурах охлаждающей воды равной или большей расчетной для данного типа конденсатора.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении знаний о механизме деаэрации конденсата в КУ и уточнении методики расчета

кислородосодержания конденсата во всем диапазоне изменения рабочих параметров КУ.

Практическая значимость заключается в том, что результаты выполненной работы позволяют решать практические задачи, направленные на повышение эффективности и надежности работы КУ. Разработанные методики расчетов и физико-математические модели позволяют уменьшить объем испытаний на натурном оборудовании ТЭЦ при разработке новых технических решений и могут использоваться при разработке мониторинговых систем как вновь разрабатываемых КУ, так и существующих установок.

Результаты исследований используются на Кировской ТЭЦ-4. Разработанные с участием автора физико-математические модели и программы для ЭВМ используются в учебном процессе ВятГУ.

Предложенные мероприятия по повышению деаэрирующей способности конденсаторов теплофикационных ПТУ при внедрении на ТЭС будут способствовать повышению эффективности и надежности работы оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель конденсатора на основе уточненной методики поверочного расчета конденсатора, позволяющей получить его характеристики при конденсации чистого пара и при конденсации пара из паровоздушной смеси при переменных присосах воздуха в любом режиме работы турбоустановки.

2. Результаты сопоставления нормативных и расчетных характеристик конденсаторов различных типов, на основе которых предложен единый подход к построению нормативных характеристик с помощью разработанной физико-математической модели.

3. Уточненная методика определения равновесных содержаний кислорода в конденсате на выходе из конденсатора паротурбинной установки.

4. Уточненная методика, позволяющая оценивать раздельное влияние загрязнений трубной системы и величины присосов воздуха на давление в конденсаторе в любых реальных режимах работы ПТУ.

5. Результаты расчетных исследований деаэрирующей способности конденсаторов конденсационной и теплофикационной турбоустановок в переменных режимах, проведенных с помощью предложенной физико-математической модели и уточненной методики определения равновесных содержаний кислорода в конденсате на выходе из конденсатора ПТУ.

6. Результаты анализа причин повышенных содержаний кислорода в конденсате на базе эксплуатационных данных по турбоустановкам Т-110/120-130.

7. Методика определения присосов воздуха под уровень конденсата, основанная на сравнении фактического значения содержания кислорода в конденсате в напорной линии конденсатных насосов и расчетного значения этого содержания, полученного по фактическому переохлаждению конденсата на днище конденсатора.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (Челябинск, 2013 г.), Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, Наука, Инновации» (Киров, 2012–2016 гг.), VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника, Электротехнология, Энергетика» (Новосибирск, 2015 г.), заседаниях кафедры «Теплотехника и гидравлика» Вятского государственного университета. Методики и разработанные физико-математические модели используются в научно-исследовательских работах и учебном процессе на кафедре теплотехники и гидравлики ВятГУ.

Достоверность и обоснованность обеспечивались применением современных методов теоретических исследований; использованием известных методик для статистической обработки экспериментальных данных; хорошим совпадением результатов расчетов по методикам автора с экспериментальными данными автора и других исследователей. Установлена корректность разработанных физико-математических моделей, их адекватность, что обусловлено качественным и количественным совпадением авторских результатов с результатами эксплуатации оборудования ТЭЦ.

Личный вклад автора определяется постановкой цели и задач исследования; разработкой уточненной методики расчета КУ; разработкой уточненной методики расчета равновесных содержаний кислорода в конденсате; проведением численных расчетов, анализе и обобщении полученных результатов по кислородосодержанию основного конденсата на выходе из конденсаторов турбоустановок различных типов, сопоставлении расчетных данных с экспериментальными; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в десяти печатных работах, включая три статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК Минобрнауки России и семь тезисов докладов научно-технических конференций. Получены также два свидетельства на регистрацию программы ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературных источников из 94 наименований. Работа представлена на 172 с., содержит 102 рисунка, 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указана степень разработанности темы исследования, сформулированы цель, основные задачи исследования, выносимые на защиту положения, научная новизна, практическая и теоретическая значимость, методы исследования, реализация результатов работы.

В **первой главе** рассмотрены основные особенности работы конденсационных установок теплофикационных турбин на переменных режимах. Показано, что одной из основных проблем при эксплуатации КУ является проблема поддержания кислородосодержания конденсата на выходе из конденсатора в нормативных пределах. Произведен обзор методик расчета содержания трудно-растворимых газов в конденсате на выходе из конденсатора и методик получения характеристик конденсаторов теплофикационных турбоустановок. Сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена выбору методики для проведения расчетных исследований и разработке уточненной физико-математической модели конденсатора. Проведено сравнение имеющихся расчетных методик для определения коэффициента теплопередачи. Установлено, что для решения поставленных задач наиболее пригодна модернизированная ВятГУ методика ВТИ (базовая методика), предполагающая наличие двух линейных участков характеристики конденсатора $t_k = f(q)$ (температура насыщения при давлении в конденсаторе от его удельной тепловой нагрузки). При этом ее первый участок определяется работой собственно конденсатора и рассчитывается по методике ВТИ, а второй представляет собой совместную характеристику системы конденсатор-эжектор, полученную на основе обобщенной характеристики переменных режимов, предложенной Мильманом О.О. (см. рисунок 1).

Поскольку методика ВТИ в явном виде не учитывает влияния присосов воздуха в вакуумную систему, предложено ее уточнение введением следующих дополнений:

– по вычисленному по методике ВТИ коэффициенту теплопередачи $k_{\bar{\sigma}}^{ном}$ для номинального режима определяется условный коэффициент теплопередачи чистого конденсатора, Вт/(м²·К)

$$k_{\bar{\sigma}}^{ном} = \frac{k_{\bar{\sigma}}^{ном}}{a}; \quad (1)$$

– на основе исходных данных определяется коэффициент теплоотдачи с водяной стороны $\alpha_{\text{в}}^{\text{НОМ}}$, Вт/(м²·К);

– из уравнения аддитивности термических сопротивлений определяется коэффициент теплоотдачи с паровой стороны $\alpha_{\text{ч}}^{\text{НОМ}}$ для условно чистого конденсатора, Вт/(м²·К);

– для учета влияния воздуха в паре на коэффициент теплоотдачи используется зависимость, предложенная Г.Г. Шкловером, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{ч.п.}}^{\text{НОМ}} = \frac{\alpha_{\text{ч}}^{\text{НОМ}}}{0,56 \cdot \left(\frac{G_{\text{возд}}^{\text{нормат}}}{D_{\text{к}}^{\text{НОМ}}} \right)^{-0,05}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{возд}}^{\text{нормат}}$ – нормативная величина присосов воздуха в конденсатор, определяемая согласно ПТЭ, в предположении нормативных присосов воздуха, заложенных в методике ВТИ;

– при известных фактических присосах воздуха $G_{\text{возд}}^{\text{факт}}$ определяется коэффициент теплоотдачи чистого конденсатора при фактических присосах воздуха, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{ч.к.}}^{\text{ф.НОМ}} = \alpha_{\text{ч.п.}}^{\text{НОМ}} \cdot 0,56 \cdot \left(\frac{G_{\text{возд}}^{\text{факт}}}{D_{\text{к}}^{\text{факт}}} \right)^{-0,05}; \quad (3)$$

– из уравнения аддитивности термических сопротивлений определяются коэффициенты теплопередачи чистого конденсатора при конденсации в нем чистого пара и паровоздушной смеси $k_{\text{ч.п.}}^{\text{НОМ}} = f(\alpha_{\text{ч.п.}}^{\text{НОМ}}, \alpha_{\text{в}}^{\text{НОМ}}, \delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}})$ и $k_{\text{ч.к.}}^{\text{НОМ}} = f(\alpha_{\text{ч.к.}}^{\text{ф.НОМ}}, \alpha_{\text{в}}^{\text{НОМ}}, \delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}})$, Вт/(м²·К);

– определяется величина коэффициентов теплопередачи, соответствующих конденсации чистого пара и паровоздушной смеси при заданной степени загрязнения, Вт/(м²·К)

$$k_{\text{п}}^{\text{НОМ}} = a \cdot k_{\text{ч.п.}}^{\text{НОМ}}, \quad k_{\text{к}}^{\text{НОМ}} = a \cdot k_{\text{ч.к.}}^{\text{НОМ}}, \quad (4)$$

где **a** – коэффициент, характеризующий состояние поверхности теплообмена и параметры стенки;

– определяются недогревы воды до температуры насыщения при давлении в конденсаторе (далее – недогрев) при конденсации чистого пара и паровоздушной смеси на номинальном режиме, °С

$$\delta t_n^{НОМ} = \frac{t_{2в} - t_{1в}}{\exp\left(\frac{k_q^{НОМ} \cdot F}{W \cdot c_в}\right) - 1}; \quad \delta t_k^{НОМ} = \frac{t_{2в} - t_{1в}}{\exp\left(\frac{k_k^{НОМ} \cdot F}{W \cdot c_в}\right) - 1} \quad (5)$$

– по известной температуре охлаждающей воды на выходе из конденсатора $t_{2в}$ и величинам недогрева на номинальном режиме $\delta t_n^{НОМ}$ и $\delta t_k^{НОМ}$ определяются температуры насыщения, соответствующие конденсации чистого пара $t_n^{НОМ}$ и паровоздушной смеси $t_k^{НОМ}$, °С.

Использование введенного в базовую методику ВТИ-ВятГУ уточнения позволяет более точно оценить раздельное влияние загрязнений и воздуха на величину давления в конденсаторе. Для этого, в дополнение к имеющейся характеристике конденсатора $t_{к.ф.} = f(D_k)$, отражающей фактическое загрязнение поверхностей теплообмена и известные присосы воздуха, с помощью соответствующей уточненной методики физико-математической модели рассчитываются зависимости $t_{ч.к.} = f(D_k)$ при $a = a^{нормат}$, $t_{н.ф.} = f(D_k)$ при $G_{возд} = 0$ кг/ч и $a = a^{факт}$, $t_{ч.н.} = f(D_k)$ при $G_{возд} = 0$ кг/ч и $a = a^{нормат}$ (см. рисунок 1).

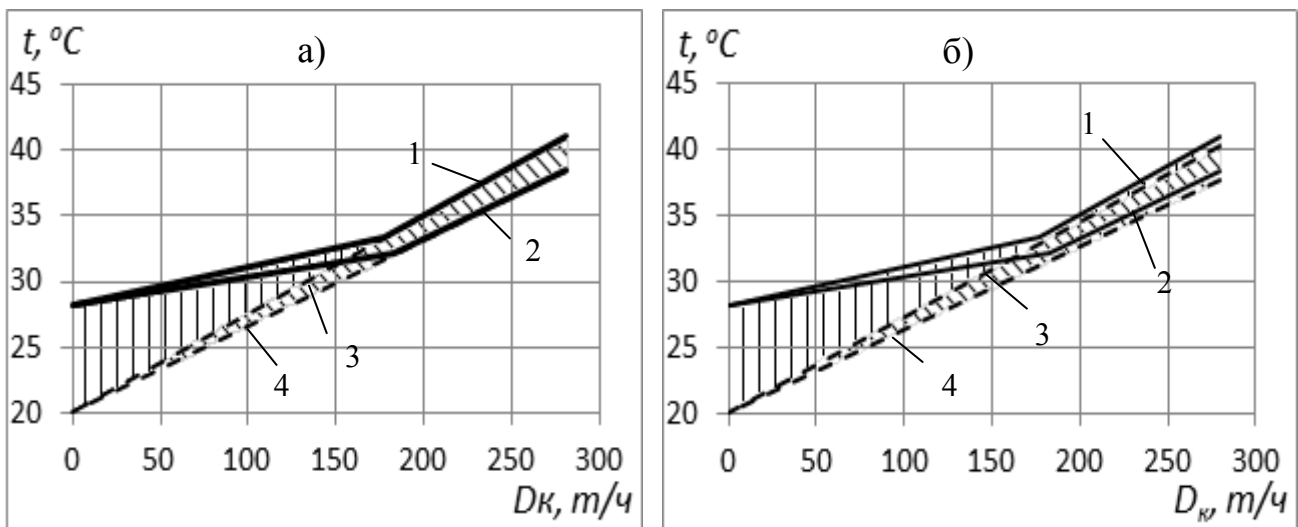


Рисунок 1 – Зависимость температуры в конденсаторе КГ2-6200 турбоустановки Т-110/120-130 от расхода в него пара, $W = 12000$ т/ч; $t_{1в} = 20$ °С:

а – расчет по базовой методике; б – расчет по уточненной базовой методике.

1 – температура насыщения при фактическом загрязнении и присосах воздуха $t_{к.ф.} = f(D_k)$

$G_{возд}^{факт} = 40$ кг/ч, $a^{факт} = 0,6$;

2 – температура насыщения при нормативном загрязнении и фактических присосах воздуха $t_{ч.к.} = f(D_k)$

$G_{возд}^{факт} = 40$ кг/ч, $a^{нормат} = 0,785$;

3 – температура насыщения при конденсации чистого пара при фактическом загрязнении $t_{н.ф.} = f(D_k)$

$G_{возд} = 0$ кг/ч, $a^{факт} = 0,6$;

4 – температура насыщения при конденсации чистого пара при нормативном загрязнении $t_{ч.н.} = f(D_k)$

$G_{возд} = 0$ кг/ч, $a^{нормат} = 0,785$.

||||| – учет влияния присосов воздуха; \\\\\ – учет влияния загрязнения.

В главе представлена методика введения уточненной физико-математической модели конденсатора в физико-математическую модель турбоустановки. Полученная совместная модель позволяет определять разность энтальпий отработавшего пара и конденсата по тепловому балансу конденсатора.

Приведена верификация уточненной физико-математической модели конденсатора на основе экспериментальных данных по трем турбоустановкам различных типов при различной температуре и расходах охлаждающей воды.

На рисунке 2 показано сравнение опытных данных для конденсатора КГ2-6200 турбины Т-110/120-13 ст. №7 Пензенской ТЭЦ с расчетными характеристиками, полученными по программе автора для условий, имевших место в эксперименте. Так как расхождение расчетных значений с опытными данными не превысило 10% на всем диапазоне паровых нагрузок, то был сделан вывод о корректности уточненной физико-математической модели.

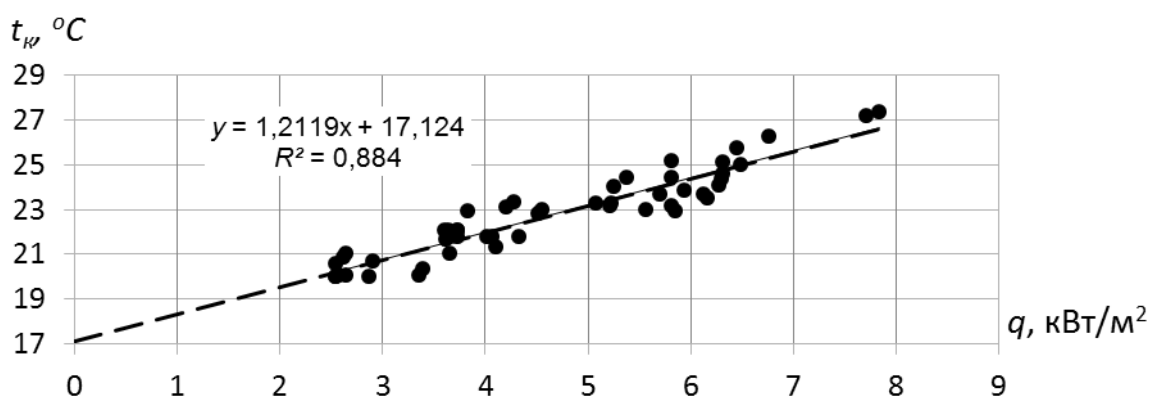


Рисунок 2 – Зависимость температуры насыщения при давлении в горловине конденсатора турбины Т-110/120-130 ст. №7 Пензенской ТЭЦ от его удельной тепловой нагрузки:

— — — — — расчет по уточненной методике ($W = 5110$ т/ч, $t_{1e} = 1^\circ\text{C}$, $a = 0,22$, $G_{возд} = 22$ кг/ч);

● – эксперимент

В третьей главе рассмотрено сопоставление расчетных и нормативных характеристик конденсаторов паротурбинных установок.

Приведены нормативные характеристики конденсаторов теплофикационных турбин мощностью от 50 до 250 МВт в виде зависимости $t_k = f(q)$. Построение осуществлялось на основе нормативных характеристик.

Произведено сравнение нормативных характеристик с аналогичными характеристиками, полученными на основе уточненной физико-математической

модели. Для этого с помощью входящего в ее состав блока расчета второго предельного режима (левая часть характеристики) определялись присосы воздуха в конденсатор, и подбором коэффициента состояния поверхности теплообмена «а» в блоке расчета первого предельного режима (правая часть характеристики) производилась адаптация модели к условиям получения нормативных характеристик. На рисунке 3 приведены пример такого сравнения.

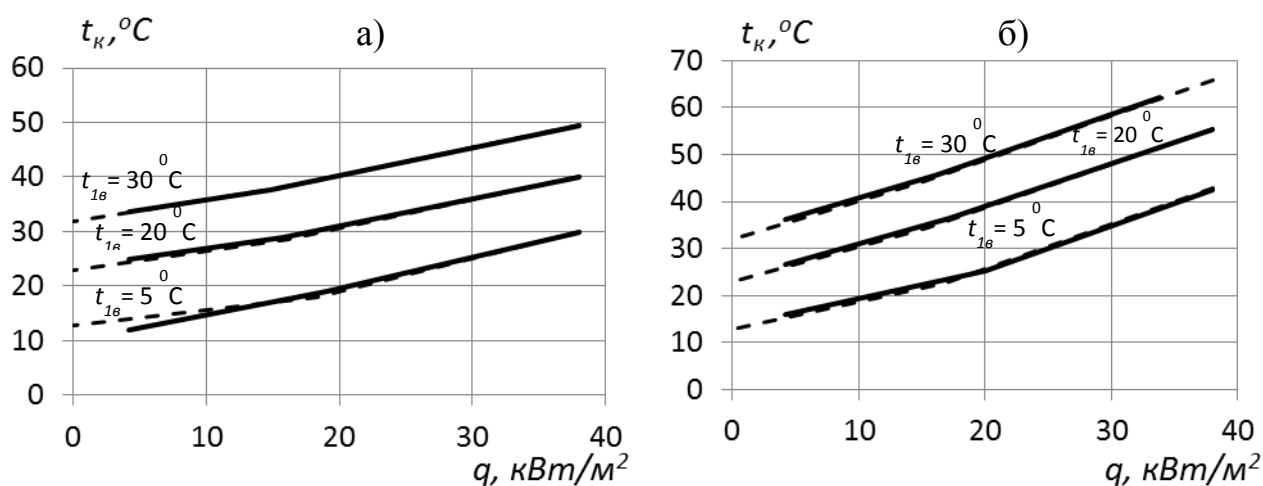


Рисунок 3 – Расчетные и нормативные характеристики конденсатора 60-КЦС теплофикационной турбины ПТ-60-130/13 при различных температурах и расходах охлаждающей воды ($F = 3000 \text{ м}^2$, $a = 0,8$, в работе один эжектор: а) $W = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $W = 3500 \text{ м}^3/\text{ч}$

————— – нормативная характеристика, $G_{\text{возд}} = 10-17 \text{ кг/ч}$;
 - - - - - расчетная характеристика, $G_{\text{возд}} = 11,9 \text{ кг/ч}$.

Результаты сопоставления нормативных характеристик с расчетными позволили сделать следующие выводы:

1. При удельных тепловых нагрузках больше граничных значений (точка перелома характеристики) при соответствующем выборе расчетного коэффициента «а» наблюдается практически полное (в пределах погрешности графического построения) совпадение расчетных и нормативных характеристик.

2. На участках с тепловыми нагрузками меньших граничных значений расхождение расчетных и нормативных характеристик объясняется различными величинами присосов воздуха, имевшими место при построении нормативных характеристик.

3. Предложен единый подход к построению нормативных характеристик, заключающийся в их расчете с помощью разработанной физико-

математической модели КУ ПТУ при нормативных для данной турбоустановки присосах воздуха во всем диапазоне изменения расходов пара в конденсатор.

В **четвертой главе** представлены разработанные методики расчета равновесных кислородосодержаний конденсата на выходе из конденсатора ПТУ. Предложены и рассмотрены две модели.

Первая модель предполагает, что при работе конденсатора в режимах неограниченных эжектором (правая ветвь характеристики), паровоздушная смесь конденсируется на всей поверхности трубного пучка, зона с пониженным значением коэффициента теплопередачи из-за наличия воздуха мала, воздух в конденсаторе практически не скапливается, а насыщение газами конденсата происходит за счет воздуха, проходящего через трубный пучок.

В соответствии с уточненной базовой методикой для любого режима работы конденсатора могут быть определены значения t_k и t_n , и соответствующие им искомые значения парциальных давлений.

Вторая модель основана на том, что есть основания полагать, что при понижении температуры охлаждающей воды ниже расчетной в условиях увеличенных значений температурных напоров количество пара, сконденсировавшегося на единице площади поверхности теплообмена на первых рядах трубок, возрастает, то есть в условиях присутствия воздуха в паре возрастает зона с пониженным значением коэффициента теплопередачи из-за наличия воздуха. Расширение этой зоны приводит к увеличению парциального давления воздуха в конденсаторе и, соответственно, к увеличению концентраций растворенных газов в конденсате на всех режимах работы турбоустановки.

Для получения характеристики конденсатора при конденсации чистого пара с учетом указанных обстоятельств рассмотрена возможность использования методики расчета конденсатора КТЗ при условии исключения из нее составляющей, учитывающей величину присосов воздуха в конденсатор. В этом случае характеристика конденсатора $t_n = f(D_k)$ представляет собой линейную зависимость, пересекающую ось ординат при $t_n = t_{1\theta}$. Использование такого приема предполагает равенство коэффициентов теплопередачи, рассчитанных по методике КТЗ и уточненной базовой методике при расчетной температуре $t_{1\theta}$ и номинальном расходе пара для данного конденсатора. Указанное равенство

обеспечивается введением специального множителя к коэффициенту теплопередачи, вычисленному по методике КТЗ, с сохранением его постоянным при проведении дальнейших расчетов.

Для определения количества кислорода в конденсате в обоих случаях используется зависимость

$$C_{O_2}^{жс} = \frac{C_{O_2}^2}{H_{O_2}} \cdot \frac{p_k}{1 - 0,378 \cdot \varepsilon_{возд}}, \quad (6)$$

где $C_{O_2}^{жс}$ – массовая равновесная концентрация кислорода в жидкой фазе;

$C_{O_2}^2$ – массовая доля кислорода в составе смеси;

H_{O_2} – константа Генри для кислорода при температуре смеси;

p_k – давление в конденсаторе (паровоздушной смеси);

$\varepsilon_{возд}$ – массовое содержание воздуха в смеси, определяемое по уравнению:

$$\varepsilon_{возд} = \frac{1}{1 + 0,622 \cdot \frac{p_n}{p_{возд}}}, \quad (7)$$

где p_n и $p_{возд}$ – парциальные давления пара и воздуха в зоне регенеративного подгрева соответственно.

Проведены расчетные исследования деаэрирующей способности конденсаторов конденсационной (К-210-130) и теплофикационной (Т-110/120-130) турбоустановок в переменных режимах.

В результате исследований установлены диапазоны применимости моделей: первая модель может быть использована при температуре охлаждающей воды равной или больше расчетной; вторая модель – при температуре охлаждающей воды ниже расчетной.

В качестве примера расчетных исследований теплофикационной турбоустановки на рисунке 4 приведены расчетные характеристики для конденсатора КГ2-6200 турбоустановки Т-110/120-130 по методикам первой и второй модели, на рисунке 5 – для конденсатора 200-КЦС-2 турбоустановки Т-210-130.

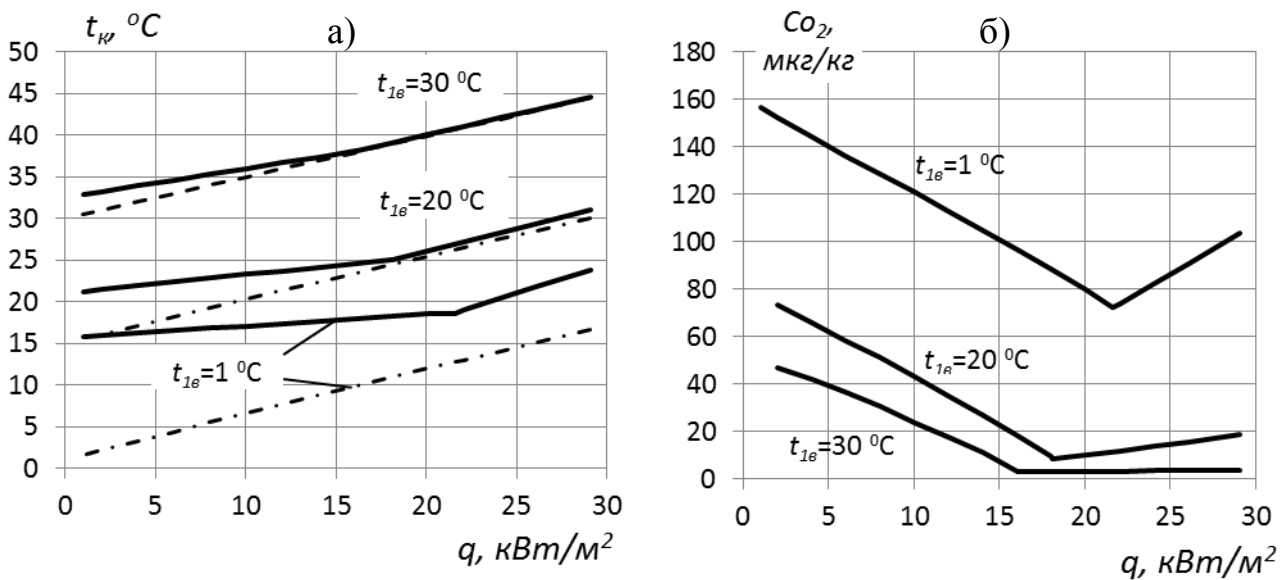


Рисунок 4 – Зависимость температуры насыщения (а) и содержания кислорода в конденсате (б) от удельной тепловой нагрузки конденсатора КГ2-6200 турбоустановки Т-110/120-130 при различных температурах охлаждающей воды, $W = 16000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $G_{\text{возд}} = 15,5 \text{ кг/ч}$:

- – расчет по уточненной базовой методике;
- – расчет по уточненной базовой методике без присосов воздуха (первая модель);
- – расчет по методике КТЗ (вторая модель).

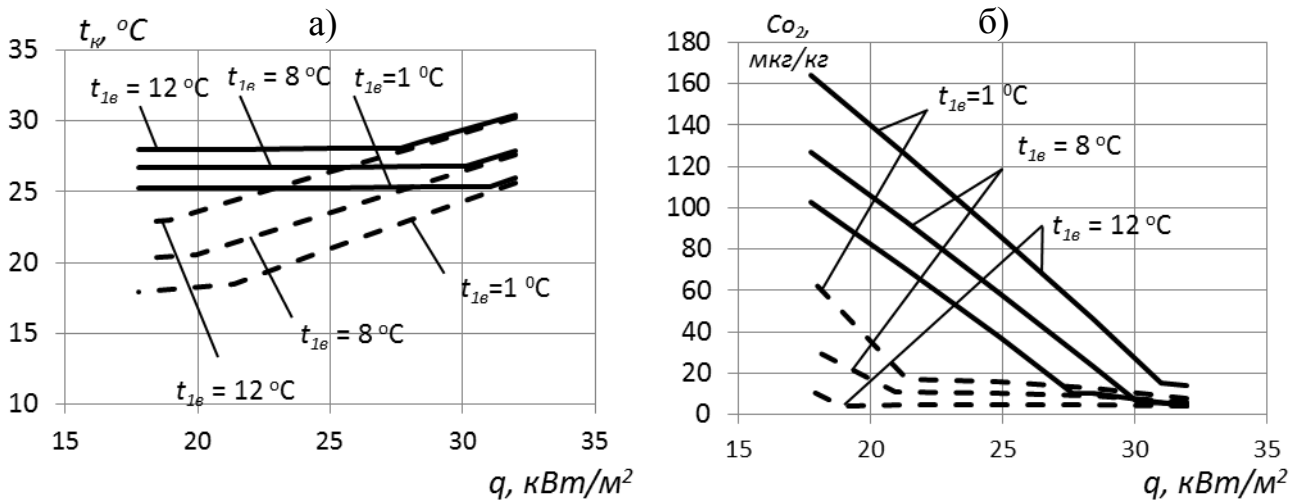


Рисунок 5 – Зависимость температуры насыщения (а) и содержания кислорода в конденсате (б) от удельной тепловой нагрузки конденсатора 200-КЦС-2 турбоустановки К-210-130 при различных температурах охлаждающей воды и присосах воздуха в конденсатор ($W = 25000 \text{ м}^3/\text{ч}$).

- – расчет при $G_{\text{возд}} = 66 \text{ кг/ч}$; ----- – расчет при $G_{\text{возд}} = 22 \text{ кг/ч}$

Проведенные расчетные исследования конденсаторов конденсационной и теплофикационной турбоустановок на переменных режимах позволили установить что:

- при нормативных присосах воздуха в вакуумную систему кислородосодержание конденсата на выходе из конденсатора, соответствующее нормам,

установленным ПТЭ (20 мкг/кг), возможно только в режимах его работы при расходах пара в конденсатор больше граничных (более 50% от номинального расхода) и температурах охлаждающей воды равной или большей расчетной для данного типа конденсатора. В остальных случаях равновесное содержание кислорода в конденсате превышает нормативные значения;

- установлено, что некоторое увеличение кислородосодержания конденсата с увеличением тепловой нагрузки (правее граничной точки) связано с соответствующим увеличением переохлаждения пленки конденсата относительно температуры насыщения при давлении в конденсаторе, особенно при низких температурах охлаждающей воды;

- повышенные присосы воздуха в вакуумную систему в режимах работы, не ограниченных эжектором (при расходах пара больше граничных), в пределах, не приводящих к перегрузке эжектора, слабо влияют на равновесное содержание кислорода в конденсате;

- увеличение присосов воздуха в вакуумную систему смещает граничную точку характеристики $t_k = f(q)$ вправо, в область больших паровых нагрузок конденсатора, расширяет область режимов, ограниченных эжектором (левая часть характеристики), и приводит к интенсивному возрастанию содержания кислорода в конденсате. В этом случае превышение кислородосодержания конденсата над нормативным наблюдается в гораздо более широком диапазоне температур и давлений, чем при нормативных присосах воздуха. При достаточно больших присосах воздуха граничное значение паровой нагрузки конденсатора может превысить его номинальную паровую нагрузку, и все режимы работы конденсатора оказываются ограничены эжектором;

- на режимах работы, ограниченных эжектором (левая часть характеристики), влияние присосов воздуха на содержание кислорода в конденсаторе резко возрастает и в теплофикационных режимах эксплуатации турбоустановок может достигать сотен мкг/кг;

- уменьшение расхода охлаждающей воды приводит к увеличению зоны интенсивной конденсации пара и, соответственно, к уменьшению зоны с пониженным значением коэффициента теплопередачи из-за наличия воздуха, что в конечном итоге приводит к некоторому улучшению деаэрирующей способности конденсатора;

– установлены диапазоны применимости предложенных моделей: первая модель должна использоваться при температуре охлаждающей воды равной или больше расчетной, вторая – при температуре охлаждающей воды ниже расчетной.

В пятой главе проведена экспериментальная проверка методик расчета равновесных кислородосодержаний конденсата на выходе из конденсаторов ПТУ. Специально организованные экспериментальные проверки предложенных расчетных методик во всем диапазоне изменения большого количества факторов в натуральных условиях не представлялись возможными, поэтому в качестве исходного материала, кроме имеющихся специально полученных экспериментальных данных, нами использован достаточно большой объем измерений, полученных эксплуатационным персоналом и зафиксированных в суточных ведомостях на нескольких ТЭЦ и ГРЭС. Были выбраны массивы эксплуатационных данных, полученные на десяти блоках К-210-130 ЛМЗ Сургутской ГРЭС-1, эксплуатационные данные по двум конденсаторам турбоустановок ПТ-60-130/13 и двум конденсаторам турбоустановок Т-110/120 Сормовской ТЭЦ, данные по конденсатору Т-110/120-130ст. №7 Пензенской ТЭЦ-1.

В качестве примера на рисунке 6 показаны результаты обработки эксплуатационных данных блоков К-210-130 ЛМЗ ст.№5 и №6 Сургутской ГРЭС-1. Сравнение результатов расчетов, выполненных в соответствии с первой и второй моделями, с эксплуатационными данными Сургутской ГРЭС-1 показало, что использование второй модели дает результаты наиболее близкие к фактическим. В этом случае наблюдается достаточно хорошая сходимость эксплуатационных данных с расчетными характеристиками, выполненными в диапазоне максимальных и минимальных расходов пара в конденсатор, что подтверждает целесообразность использования принятой методики;

На рисунках 7–8 показаны экспериментальные данные и расчетные зависимости, полученные при обработке данных по турбоустановке ПТ-60-130/13 ст. №1 Сормовской ТЭЦ, на основе этой обработки установлено следующее:

– переменные q и t_{16} взаимно коррелируют в полях $C_{O_2} = f(q)$ и $C_{O_2} = f(t_{16})$, что объясняется снижением паровой нагрузки конденсаторов в отопительный период с одновременным снижением температуры охлаждающей воды;

– проведенное сравнение эксплуатационных данных по турбоустановкам ст. №1 и ст. №2 Сормовской ТЭЦ и расчетных зависимостей показало их удовлетворительное совпадение, что также подтверждает правомерность использования предложенных методик расчета для оценки кислородосодержания конденсата на всех возможных режимах работы турбоустановки.

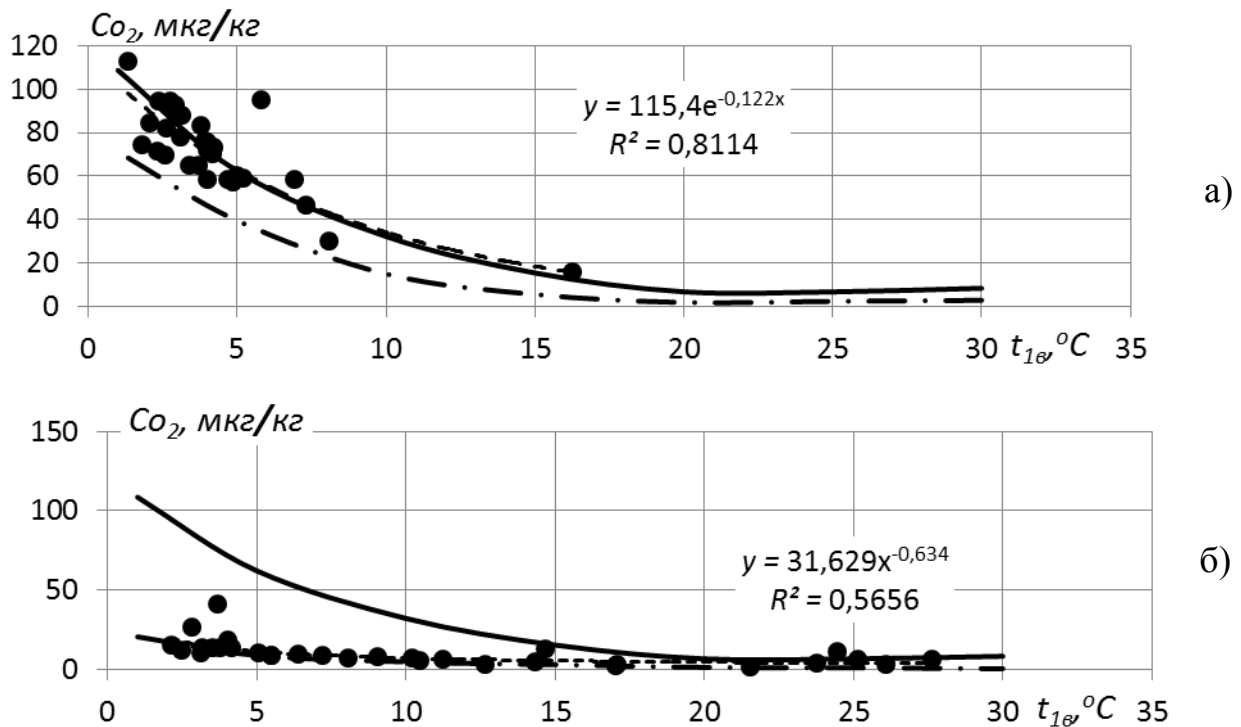


Рисунок 6 – Зависимость кислородосодержания конденсата на выходе из конденсаторов 200-КЦС-2 турбоустановок К-210-130 от температуры охлаждающей воды на входе:

● – данные ГРЭС; - - - - - линия тренда.

а) ст. №5 $W = 20000$ т/ч, $a = 0,73$, $G_{\text{гозд}} = 22$ кг/ч: ———— – расчетная зависимость при $D_{\text{п}}^{\text{к}} = 450$ т/ч; - · - · - · - - – расчетная зависимость при $D_{\text{п}}^{\text{к}} = 260$ т/ч;

б) ст. №6 $W = 17000$ т/ч, $a = 0,8$: ———— – расчетная зависимость при $D_{\text{п}}^{\text{к}} = 450$ т/ч, $G_{\text{гозд}} = 22$ кг/ч; - · - · - · - - – расчетная зависимость при $D_{\text{п}}^{\text{к}} = 260$ т/ч, $G_{\text{гозд}} = 10$ кг/ч.

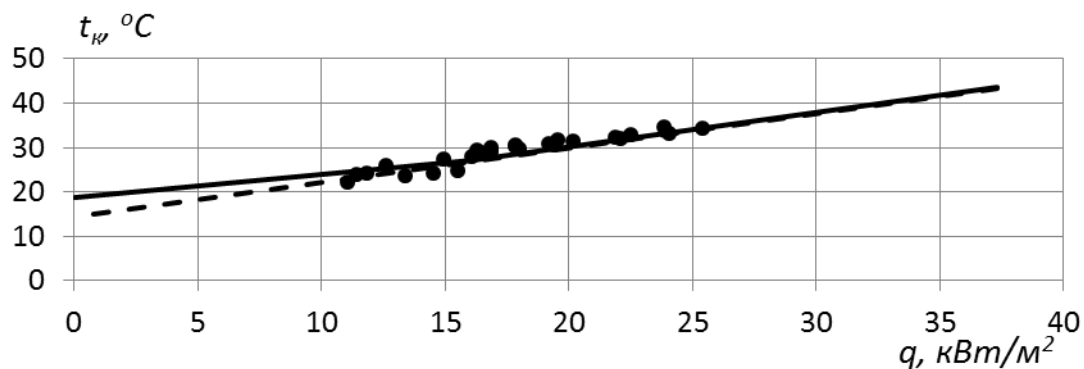


Рисунок 7 – Зависимости температуры насыщения при давлении в конденсаторе 60-КЦС турбоустановки ст. №1 от его удельной тепловой нагрузки: $W = 5000$ т/ч; $a = 0,7$; $t_{1в} = 10-15^{\circ}\text{C}$:

———— – расчет при $G_{\text{гозд}} = 13$ кг/ч; - - - - - расчет при $G_{\text{гозд}} = 0$ кг/ч; ● – данные ТЭЦ

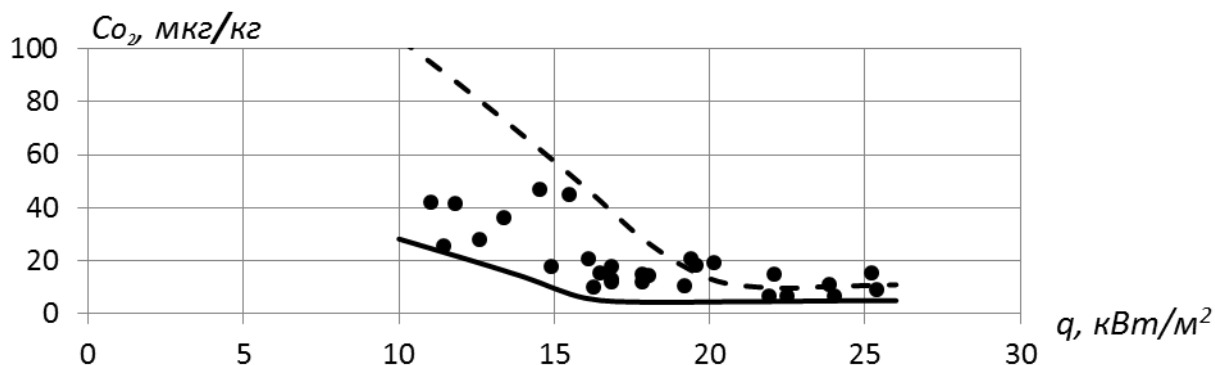


Рисунок 8 – Зависимость кислородосодержания конденсата на выходе из конденсатора 60-КЦС турбоустановки ст. №1 от его удельной тепловой нагрузки: $W = 5000$ т/ч; $a = 0,7$; $t_{1e} = 11-15^\circ\text{C}$:
 ———— расчет при $G_{\text{возд}} = 16,6$ кг/ч; - - - - - расчет при $G_{\text{возд}} = 50$ кг/ч; ● – данные ТЭЦ

На основе обработки эксплуатационных данных по содержанию кислорода в конденсате на выходе из конденсаторов турбоустановок Т-110/120-130 ТМЗ Сормовской ТЭЦ установлено следующее:

– эксплуатационные и расчетные данные по кислородосодержанию конденсата на выходе из конденсатора турбоустановки Т-110/120-130 ст. №3 Сормовской ТЭЦ в виде зависимостей $C_{o_2} = f(q)$ и $C_{o_2} = f(t_{1e})$ показали хорошее согласование расчетных методик по данной турбоустановке (см. рисунок 9).

– сравнение эксплуатационных и расчетных величин, полученных на основе данных по конденсатору турбоустановки Т-110/120-130 ст. №4 Сормовской ТЭЦ, показало, что высокие значения кислородосодержания конденсата наблюдаются при высоких температурах охлаждающей воды и полностью открытой регулирующей диафрагме ЧНД (см. рисунок 10).

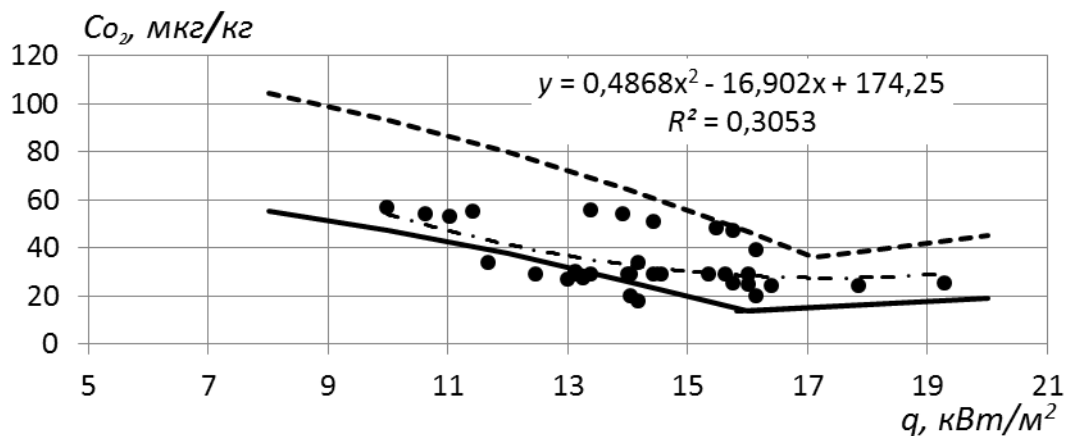


Рисунок 9 – Зависимость кислородосодержания конденсата на выходе из конденсатора КГ2-6200 турбоустановки ст. №3 от его удельной тепловой нагрузки: $W = 7000$ т/ч; $a = 0,32$; $G_{\text{возд}} = 16$ кг/ч: ● – данные ТЭЦ; - - - - - линия тренда; ———— расчет при $t_{1e} = 16^\circ\text{C}$; - - - - - расчет при $t_{1e} = 4^\circ\text{C}$.

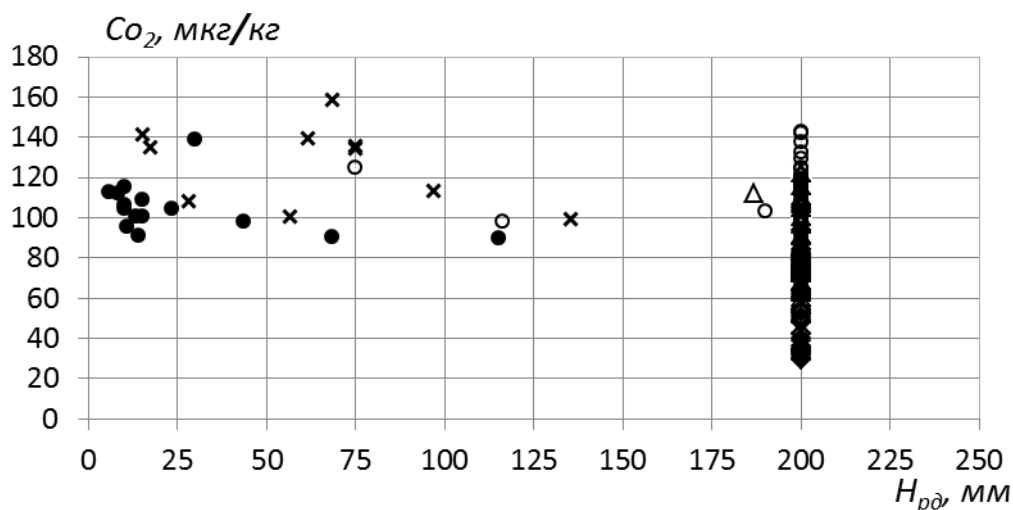


Рисунок 10 – Зависимость кислородосодержания конденсата на выходе из конденсатора КГ2-6200 турбоустановки ст. №4 от степени открытия регулирующих диафрагм ЧНД ($W = 6300$ т/ч).

● – $t_{1e} = 5-9$ °С, × – $t_{1e} = 10-13$ °С, ○ – $t_{1e} = 14-16$ °С, △ – $t_{1e} = 17-24$ °С, ◇ – $t_{1e} = 25-26$ °С.

– на данной установке сливные насосы выведены из эксплуатации, и конденсат ПНД через расширитель дренажей поступает в конденсатосборник под уровень конденсата. Конденсат на напоре конденсатных насосов при тепловых нагрузках, соответствующих открытым РД ЧНД, имеет температуру 50 °С и выше, что при трех включенных по рабочему пару ступенях эжектора вызывает его неустойчивую работу.

– обработка эксплуатационных данных с помощью предложенных в работе физико-математических моделей показала, что в ряде режимов (при включенных теплофикационных отборах) эксплуатационные величины содержаний кислорода в конденсате существенно отличаются от расчетных (даже при максимально возможных по перегрузке эжектора присосах воздуха) из-за дополнительных присосов воздуха в зонах теплофикационных отборов. При этом возникает возможность появления присосов воздуха непосредственно под уровень конденсата.

– результаты обработки эксплуатационных данных турбоустановки Т-110/120-130 ст. №7 Пензенской ТЭЦ также подтвердили наличие присосов воздуха в тракт основного конденсата до конденсатных насосов.

В следующем разделе главы предложена методика определения наличия присосов воздуха под уровень конденсата, основанная на сравнении фактического значения содержания кислорода в конденсате в напорной линии конден-

сатных насосов с расчетным значением этого содержания, полученного по фактическому переохлаждению конденсата на днище конденсатора.

В последнем разделе главы предложен перечень мероприятий по повышению деаэрирующей способности конденсаторов теплофикационных ПТУ, показана технико-экономическая целесообразность их использования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В рамках диссертационной работы решены следующие задачи:

1. Предложена уточненная методика поверочного расчета конденсатора, позволяющая получить его характеристики при конденсации пара из паровоздушной смеси с учетом влияния величины присосов воздуха в конденсатор в любом режиме работы турбоустановки.

2. Разработана физико-математическая модель конденсатора на основе уточненной методики и проведена ее верификация с использованием экспериментальных данных, полученных на турбоустановках различных типов.

3. Предложена уточненная методика, позволяющая оценивать раздельное влияние на давление пара в конденсаторе величины присосов воздуха и загрязнения его трубной системы в любых реальных режимах работы ПТУ.

4. Выполнено сопоставление нормативных и расчетных характеристик конденсаторов различных типов. Предложен единый подход к построению нормативных характеристик, заключающийся в их построении с помощью разработанной физико-математической модели КУ ПТУ при нормативных для данной турбоустановки присосах воздуха во всем диапазоне изменения расходов пара в конденсатор.

5. Уточнена расчетная методика определения равновесных кислородосодержаний конденсата на выходе из конденсатора ПТУ во всем возможном диапазоне его паровых нагрузок, расходов и температур охлаждающей воды, присосов воздуха и коэффициентов чистоты поверхностей теплообмена.

6. Проведены расчетные исследования деаэрирующей способности конденсаторов конденсационной и теплофикационной турбоустановок в переменных режимах работы с помощью предложенной физико-математической модели. В ходе расчетных исследований установлено что:

– при нормативных присосах воздуха в вакуумную систему равновесное кислородосодержание конденсата на выходе из конденсатора, соответствующее нормам, установленным ПТЭ (20 мкг/кг), возможно только при расходах пара в конденсатор больше граничных (более 50% от номинального расхода) и температурах охлаждающей воды равной или большей расчетной для данного типа конденсатора. В остальных случаях равновесное содержание кислорода в конденсате превышает нормативные значения;

– повышенные присосы воздуха в вакуумную систему в режимах работы, неограниченных эжектором (при расходах пара выше граничного), в пределах, не приводящих к перегрузке эжектора, слабо влияют на равновесное содержание кислорода в конденсате;

– увеличение присосов воздуха в вакуумную систему расширяет область режимов, ограниченных эжектором (левая часть характеристики), и приводит к интенсивному возрастанию кислорода в конденсате. В этом случае превышение кислородосодержания конденсата над нормативным наблюдается в гораздо более широком диапазоне температур и давлений, чем при нормативных присосах воздуха;

– уменьшение расхода охлаждающей воды приводит к увеличению зоны интенсивной конденсации пара и, соответственно, к уменьшению зоны с пониженным значением коэффициента теплопередачи из-за наличия воздуха, что в конечном итоге приводит к некоторому улучшению деаэрирующей способности конденсатора.

7. Выполнена экспериментальная проверка методик расчета равновесных кислородосодержаний конденсата на выходе из паротурбинных установок на базе эксплуатационных данных ГРЭС и ТЭЦ. В ходе проверки показано что:

– наблюдается достаточно хорошая сходимость эксплуатационных данных с расчетными характеристиками, выполненными в диапазоне максимальных и минимальных расходов пара в конденсатор, что подтверждает целесообразность использования принятой методики;

– результаты расчетных исследований по выявлению влияния различных эксплуатационных факторов хорошо согласуются с эксплуатационными данными;

– экспериментальные данные подтверждают существование режимов работы конденсатора, ограниченных эжектором, во всем эксплуатационном диапазоне подачи пара в конденсатор.

8. Показана пригодность предложенной методики для анализа причин повышенных содержаний кислорода в конденсате на базе эксплуатационных данных по турбоустановкам Т-110/120-130.

9. Предложена методика определения наличия присосов воздуха под уровень конденсата, основанная на сравнении фактического значения содержания кислорода в конденсате в напорной линии конденсатных насосов и расчетным значением этого содержания, полученного по фактическому переохлаждению конденсата на днище конденсатора.

10. Предложен перечень мероприятий по повышению деаэрирующей способности конденсаторов теплофикационных ПТУ, показана технико-экономическая целесообразность использования этих мероприятий.

Предложенные в данной работе методики и разработанные на их основе физико-математические модели могут быть использованы как при проектировании конденсационных устройств и основных эжекторов паротурбинных установок, так и в условиях эксплуатации при проведении модернизации оборудования, для анализа эффективности его работы и с целью выявления дефектов.

Дальнейшие исследования будут проводиться в направлении разработки программной и аппаратной части диагностической системы деаэрирующей способности КУ, основанной на предложенных моделях. Планируется разработка новых мероприятий по повышению деаэрирующей способности конденсатора.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Шемпелев А. Г. Результаты экспериментальной оценки составляющих суммарного теплового потока в конденсаторы теплофикационных турбин / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Энергетик. – 2014. – №9. – С. 41–43 (0,349 п.л. / 0,175 п.л.).

2. Шемпелев А. Г. О результатах сопоставления расчетных и нормативных характеристик конденсаторов паротурбинных установок в широком диапазоне их паровых нагрузок / А. Г. Шемпелев, В. М. Сущих, **П. В. Иглин** // Энергетик. – 2015. – №10. – С. 60–64 (0,523 п.л. / 0,174 п.л.).

3. Шемпелев А. Г. Причины повышенного содержания кислорода в конденсате паротурбинных установок / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – №4. – С. 61–64 (0,384 п.л. / 0,192 п.л.).

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014615561, дата регистрации 28.05.2014. Поверочный тепловой расчет конденсаторов паровых турбин / А. Г. Шемпелев, П. В. Иглин (Россия). Заявка №2014613553 от 18 апреля 2014 г. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Программы для ЭВМ. Базы данных. Типологии интегральных микросхем». 2014. №6(92).

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016611806, дата регистрации 10.02.2016. Расчет содержания коррозионно-активных газов в основном конденсате / А. Г. Шемпелев, П. В. Иглин (Россия). Заявка №2015662407 от 16 декабря 2015 г. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Программы для ЭВМ. Базы данных. Типологии интегральных микросхем». 2016. №3(113).

Статьи в сборниках научных трудов, доклады в материалах международных и всероссийских конференций:

6. Шемпелев А. Г. О разработке математической модели конденсатора теплофикационной турбины оснащенного водоструйными эжекторами / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК–2012): сб. материалов / ВятГУ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM) (Электротехнический факультет. Секция «Физика и теплотехника», статья №6) (0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

7. Шемпелев А. Г. О некоторых способах углубления вакуума в конденсаторах теплофикационных паровых турбин / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК–2012): сб. материалов / ВятГУ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM) (Электротехнический факультет. Секция «Физика и теплотехника», статья №7) (0,3125 п.л. / 0,156 п.л.).

8. Иглин П. В. О влиянии некоторых факторов на содержание кислорода в конденсате на выходе из конденсаторов теплофикационных турбин / **П. В. Иглин**, А. Г. Шемпелев // Сборник материалов Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере». – г. Челябинск, ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 22–26 апреля 2013 г. – С. 155–159 (0,3125 п.л. / 0,156 п.л.).

9. Шемпелев А. Г. Разработка предложений по реновации характеристик конденсаторов теплофикационных паротурбинных установок / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК–2014): сб. материалов / ВятГУ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2014. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM) (Электротехнический факультет. Секция «Физика и теплотехника», статья №5).–С. 1883–1887 (0,3125 п.л. / 0,156 п.л.).

10. Шемпелев А. Г. О методах определения содержания кислорода в конденсате на выходе из конденсаторов теплофикационных турбин / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК–2015): сб. материалов / ВятГУ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2015. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM) (Электротехнический факультет. Секция «Физика и теплотехника»).–С. 838–841 (0,25 п.л. / 0,125 п.л.).

11. Шемпелев А. Г. О методе расчета содержания агрессивных газов в основном конденсате / **П. В. Иглин**, А. Г. Шемпелев // Сборник научных трудов VII Международной

научной конференции молодых ученых «Электротехника, Электротехнология, Энергетика». –г. Новосибирск, 9–12июня 2015 г. – С. 449–453 (0,3125 п.л. / 0,156 п.л.).

12. Шемпелев А. Г. Разработка методики расчета содержания агрессивных газов в конденсате на выходе из конденсаторов паровых турбин / А. Г. Шемпелев, **П. В. Иглин** // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК–2016): сб. материалов / ВятГУ; отв. ред. С. Г. Литвинец. – Киров, 2016. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM) (Электротехнический факультет. Секция «Физика и теплотехника», статья №4).–С. 1676–1681 (0,375 п.л. / 0,1875 п.л.).

Основные сокращения

ТЭС – тепловая электростанция; КУ – конденсационная установка; ПТУ – паротурбинная установка; ГРЭС – государственная районная электростанция; ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ПТЭ – правила технической эксплуатации; ИТО – Институт проблем теплообмена (США); ВТИ – Всероссийский теплотехнический институт; КТЗ – Калужский турбинный завод; ВятГУ – Вятский государственный университет; ЧНД – часть низкого давления.

Основные условные обозначения

$k_6^{\text{НОМ}}$ — коэффициент теплопередачи для номинального режима, Вт/(м² К); $k_{\text{ч}}^{\text{НОМ}}$ — коэффициент теплопередачи для чистого конденсатора при номинальном режиме, Вт/(м² К); $\alpha_{\text{в}}^{\text{НОМ}}$ — коэффициент теплоотдачи с водяной стороны для номинального режима, Вт/(м² К); $\alpha_{\text{ч}}^{\text{НОМ}}$ — коэффициент теплоотдачи с паровой стороны при номинальных присосах воздуха, для условно чистого конденсатора, Вт/(м² К); $\alpha_{\text{ч.п}}^{\text{НОМ}}$ — коэффициент теплоотдачи при конденсации чистого пара, Вт/(м² К); $G_{\text{возд}}^{\text{НОРМАТ}}$ – нормативная величина присосов воздуха в конденсатор, кг/с (кг/ч); $D_{\text{к}}^{\text{НОМ}}$ – номинальный расход пара в конденсатор, кг/с; $G_{\text{возд}}^{\text{ФАКТ}}$ – фактическая величина присосов воздуха в конденсатор, кг/с (кг/ч); $\alpha_{\text{ч.к}}^{\text{Ф.НОМ}}$ — коэффициент теплоотдачи с паровой стороны при фактических присосах воздуха, для условно чистого конденсатора, Вт/(м² К); $k_{\text{ч.п}}^{\text{НОМ}}, k_{\text{ч.к}}^{\text{Ф.НОМ}}$ – коэффициент теплопередачи чистого конденсатора при конденсации в нем чистого пара и паровоздушной смеси, соответственно, Вт/(м² К); $k_{\text{п}}^{\text{НОМ}}, k_{\text{к}}^{\text{НОМ}}$ – величина коэффициента теплопередачи соответствующего конденсации чистого пара и паровоздушной смеси, соответственно, при заданной степени загрязнения, Вт/(м² К); a – коэффициент характеризующий состояние поверхности теплообмена и параметры стенки; $\delta t_{\text{п}}^{\text{НОМ}}, \delta t_{\text{к}}^{\text{НОМ}}$ – недогрев воды до температуры насыщения при конденсации чистого пара и паровоздушной смеси, соответственно, на номинальном режиме, °С; $t_{1\text{в}}, t_{2\text{в}}$ – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор и на выходе из него, °С; W – расход охлаждающей воды, кг/с (т/ч); F – площадь поверхности нагрева конденсатора, м²; $C_{\text{в}}$ – теплоемкость, кДж/(кг·К); $t_{\text{п}}^{\text{НОМ}}$ – температура насыщения, соответствующая конденсации чистого пара на номинальном режиме, °С; $t_{\text{к}}^{\text{НОМ}}$ – температура насыщения, соответствующая конденсации паровоздушной смеси на номинальном режиме, °С; q – удельная тепловая нагрузка конденсатора, кВт/м²; $G_{\text{возд}}$ – величина присосов воздуха в конденсатор, кг/ч; $t_{\text{к.ф.}}$ – характеристика конденсатора при конденсации в нем паровоздушной смеси при фактической степени загрязнения, °С; $t_{\text{н.ф.}}$ – характеристика конденсатора при конденсации в нем чистого пара при фактической степени загрязнения, °С; $t_{\text{ч.к.}}$ – характеристика чистого конденсатора при конденсации в нем паровоздушной смеси, °С; $t_{\text{ч.п.}}$ – характеристика чистого конденсатора при конденсации в нем чистого пара, °С; $D_{\text{п}}$ – расход пара в конденсатор, кг/с (т/ч); $t_{\text{к}}$ – характеристика конденсатора при конденсации в нем паровоздушной смеси, °С; $t_{\text{п}}$ – характеристика конденсатора при конденсации в нем чистого пара, °С; $C_{\text{O}_2}^{\text{ж}}$ (C_{O_2}) – массовая равновесная концентрация кислорода в жидкой фазе, мкг/кг; $C_{\text{O}_2}^{\text{г}}$ – массовая доля кислорода в составе смеси, мкг/кг; H_{O_2} – константа Генри для кислорода при температуре смеси в единицах давления, Па; $p_{\text{к}}$ — давление в конденсаторе (паровоздушной смеси), Па; $\varepsilon_{\text{возд}}$ – массовое содержание воздуха в смеси; $p_{\text{п}}$ и $p_{\text{возд}}$ – парциальные давления пара и воздуха в зоне регенеративного подогрева, Па; $H_{\text{р0}}$ – степень открытия регулирующих диафрагм ЧНД по шкале сервомотора, мм.