

На правах рукописи

Тайлашева Татьяна Сергеевна

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХБАРАБАННЫХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ КОТЛОВ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Заворин Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Пузырев Е.М.

доктор физико-математических наук, доцент

Крайнов А.Ю.

Ведущая организация:

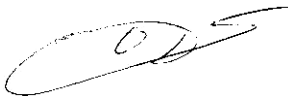
ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «22» декабря 2009 года в 14³⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 в Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, корпус 10, ауд. 228.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

Автореферат разослан «20» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Долматов О.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации определяется ее направленностью на создание научных основ обеспечения безопасности, продления срока межремонтного обслуживания и повышение эффективности эксплуатации двухбарабанных промышленных котлов.

Наряду с крупными электро- и теплогенерирующими станциями, входящими в структуру так называемой «большой» энергетики, значительное место занимает промышленная энергетика, где вырабатываемая тепловая энергия в виде парового и водяного теплоносителей предназначена для теплоснабжения населения и технологического использования в производственных процессах. В этой сфере центральное место занимает проблематика повышения надежности эксплуатации котельного оборудования и связанной с этим эффективности топливоиспользования.

В сфере малой энергетики с отопительным и промышленным использованием пара широкое распространение получили двухбарабанные водотрубные паровые котлы типа ДКВР производства Бийского котельного завода. Всего выпущено и эксплуатируется по сегодняшний день несколько сотен тысяч котлов типа ДКВР различной производительности, что дает основание относить эти котлы к наиболее распространенным в мире. Многолетний опыт эксплуатации двухбарабанных котлов выявляет систематические разрушения основных конструктивных элементов испарительных экранных систем. Неоднократно эти элементы подвергаются замене – как в период плановых ремонтов, так и во время аварийных остановов. Обеспечение эксплуатационной надежности испарительных элементов и возможности бесперебойной работы промышленных и отопительных котлов требует особого внимания. Практика многолетней эксплуатации котлов типа ДКВР показывает, что решение сформулированной проблемы возможно только при создании научных основ прогностического моделирования процессов, протекающих при работе испарительных экранных систем.

Актуальность темы диссертации определяется ее соответствием основным направлениям научной деятельности Томского политехнического университета (направление «Разработки методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов») и находится в сфере приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ («Энергетика и энергосбережение»).

Целью диссертационного исследования является разработка прогностических методов оценки влияния условий теплопередачи в топке котла на работу испарительных элементов в двухбарабанных системах естественной циркуляции и обоснование диапазона допустимых тепловых

нагрузок с использованием численного моделирования на основе пакета прикладных программ FIRE 3D.

Основные задачи исследования:

- выявление эксплуатационных параметров теплопереноса, обуславливающих причины разрушений испарительных элементов в двухбарабанных циркуляционных системах;
- проведение вычислительных экспериментов с целью оценки влияния особенностей конструкции, способов компоновки горелок и режимов работы на тепломассообменные характеристики испарительных элементов в двухбарабанной гидродинамической схеме;
- численные исследования условий работы солевого контура циркуляции двухбарабанных систем;
- выявление наиболее опасных участков испарительных элементов с учетом основных эксплуатационных факторов.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые проведены численные исследования процессов в топке и условий циркуляции в настенных экранах для двухбарабанных систем при сжигании природного газа;
- получены новые данные о распределении температур и аэродинамической структуры топочного объема, плотности теплового потока на ограждающие поверхности топки котла ДКВР, позволяющие анализировать условия работы не только экранных панелей, но и отдельных труб в их составе;
- впервые разработаны методические положения по применению математического моделирования для оценки влияния условий теплопередачи на работу испарительных элементов в двухбарабанных циркуляционных системах.

Практическая значимость работы:

- полученные результаты создают объективные предпосылки для прогнозирования наиболее опасных участков испарительных элементов контура циркуляции;
- результаты исследования применимы для разработки мероприятий по предотвращению аварийных разрушений экранных поверхностей нагрева двухбарабанных котлов;
- основные результаты и рекомендации используются в эксплуатационной практике и при конструировании котлов в ОАО «Бийский котельный завод» (г. Бийск, Алтайский край);
- методика исследования используется в учебном процессе по специальности 140502 «Котло- и реакторостроение» в Томском политехническом университете (включена в лекционный курс и лабораторный практикум по дисциплине «Надежность,

эксплуатационные режимы, исследование и наладка котельных установок», в тематику выпускных квалификационных работ и учебно-исследовательской работы студентов).

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных математических моделей и методов вычислений, согласованием с экспериментальными данными других авторов, а также с результатами, полученными по нормативному методу тепловых расчетов, и результатами инструментальных измерений.

Полученные в диссертации экспериментальные результаты коррелируют с данными других авторов.

На защиту выносятся:

- результаты численных экспериментов по определению характеристик топочного процесса для широкого диапазона нагрузки котлов ДКВР-20 при сжигании природного газа;
- результаты теоретического и экспериментального анализа условий работы настенных испарительных элементов в двухбарabanной циркуляционной системе котлов типа ДКВР;
- методические положения прогностической оценки работоспособности труб в испарительных элементах на основе применения математического моделирования топочного процесса;
- рекомендации по организации топочного процесса при реконструкции и режимам эксплуатации реконструированных с переводом на сжигание природного газа котлов типа ДКВР-20.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на VII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2001 г.), VII, XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2002 г., 2009 г.), Региональной научной конференции «Наука. Техника. Инновация» (Новосибирск, 2002 г.), VI Всероссийском совещании «Энергосбережение, энергоэффективность и энергетическая безопасность регионов России» (Томск, 2005 г.), V семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока «Проблемы теплофизики и теплоэнергетики» (г. Иркутск, 2007 г.), III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (г. Екатеринбург, 2007 г.), Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов «XXXVII неделя науки СПбГПУ» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.), VI Всероссийском семинаре вузов по теплофизике и теплоэнергетике (г. Красноярск, 2009 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 15 печатных работах, среди которых 2 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения и списка литературы (109 наименований). Работа содержит 153 страницы, 8 таблиц и 48 рисунков.

Личное участие автора является определяющим на всех этапах работы: поставлена задача исследования, выполнены анализ и обобщение работ по основополагающим принципам методических основ прогностической оценки надежности испарительных элементов. Единолично выполнены экспериментальные исследования, проведен анализ и сформулированы выводы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе приведены основные сведения об эволюционном развитии современных двухбарабанных промышленных и отопительных котлов, представлено разнообразие конструктивных решений и основные особенности теплопереноса в существующих двухбарабанных водотрубных котлах.

Рассмотрены особенности циркуляционных систем, реализованных в двухбарабанных паровых водотрубных котлах, для которых характерно противодействие двух тенденций. С одной стороны, это – стремление к универсальности и экономичности котельных агрегатов в условиях низкого качества питательной воды, что достигается за счет применения ступенчатого испарения с установкой во вторую ступень испарения выносных циклонов. С другой стороны, очевидна направленность на упрощение изготовления и эксплуатации котлов за счет исключения сложных схем для последней ступени испарения. Циркуляционная система котлов ДКВР-20, имеющая довольно сложное устройство солевого отсека, наиболее значима для оценки влияния эксплуатационных факторов на условия надежной работы котельных агрегатов.

Выполнен анализ опыта освоения и эксплуатации, а также исследований современных двухбарабанных котлов малой мощности, большой вклад в которые внесли Н.С. Рассудов, В.В. Померанцев, А.А. Шершнев, В.Ф. Дэрк, Ю.С. Знаменский, В.П. Артемьев, А.А. Дорожков, Б.Е. Акопьянц, Г.А. Усольцев и др. Анализ публикаций показал, что обычно среди причин аварийных ситуаций и инцидентов выделяют такие, которые в большей мере определяются квалификацией обслуживающего персонала и уровнем организации эксплуатации, чем условиями работы самих котлов. Тем не менее, в статистике аварий с достаточной достоверностью установлено доминирующее положение, которое занимают повреждения

труб боковых экранов, включенных в солевой отсек испарения. К определяющим факторам этих разрушений, происходящих вследствие интенсивного накипеобразования, относят солесодержание котловой воды и условия теплопереноса (расход циркулирующей среды при изменении паропроизводительности, тепловой поток на испарительную поверхность и др.). При этом отсутствуют результаты изучения условий низкой работоспособности экранных труб в зависимости от режимных параметров котлов и соответствующих им условий организации топочного процесса. На основе обобщающего анализа сформулированы задачи исследований, соответствующие поставленной цели работы.

Во второй главе представлены основные методические положения проведенных исследований. Приведено описание объекта исследований – котла ДКВР-20, его конструктивных особенностей.

Описаны основные методы технического обследования эксплуатационного состояния топочных экранов двухбарабанных циркуляционных систем. Представлена основная методика проведения визуально-измерительного контроля экранных поверхностей, в том числе ультразвуковой толщинометрии и измерения твердости металла. Изложена методика проведения металлографического анализа структуры металла испарительных элементов. Для определения химического состава внутритрубных отложений испарительных элементов использовался метод валового химического анализа, а для фазового состава – метод рентгено-фазового анализа.

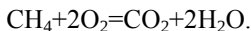
Специфика условий эксплуатации котлов типа ДКВР (с чередующимися резкими наборами и сбросами нагрузки) влияет не только на состояние материала труб экранных поверхностей солевого контура, но и на условия его охлаждения. Для оценки условий работы гидравлической системы в области технического минимума проведены тепло-гидравлические расчеты солевого контура циркуляции. Для расчетов контуров циркуляции использована нормативная методика¹.

Средством вариативных исследований внутритопочных процессов в названных условиях теплопередачи определено численное моделирование. Используемая математическая модель учитывала условия течения, горения и теплопереноса в гомогенной среде.

Для описания аэродинамики процесса, учитывая дозвуковой характер турбулентных течений в топках, использованы стандартные полуэмпирические модели турбулентности («*k-ε*» модель турбулентности Лаундера и Сполдинга).

¹ Гидравлический расчет котельных агрегатов [Текст] : нормативный метод / Под ред. В. А. Локшина. – М.: Энергия, 1978. – 255 с. : ил.

При постановке задачи для малогабаритной камеры котла предполагалось, что процесс стационарный, теплофизические свойства газовой фазы зависят от концентрации компонентов (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , CH_4) и температуры. Горение газообразного топлива описывается следующей брутто-реакцией:



В этом случае математическая модель включает уравнения, записанные для краткости только для одной x – координаты:

– неразрывности

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

– баланса массы газовых компонентов

$$\frac{\partial \rho C_{N_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C_{O_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i} \right) - \beta J; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho C_{gas} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{gas}}{\partial x_i} \right) - J; \quad (4)$$

$$\sum_{j=N_2, O_2, gas, CO_2, H_2O} C_j = 1, \quad C_{N_2} + C_{O_2} + C_{gas} + C_{CO_2} + C_{H_2O} = 1; \quad (5)$$

– движения

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho \kappa + (\mu + \mu_t) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right]; \quad (6)$$

$j=1,2,3$

– энергии

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_{tT}}{Pr_t} \right) c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + Q_p^n J - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i}; \quad (7)$$

– состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{gas}}{M_{CH_4}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}. \quad (8)$$

где U_i – компоненты вектора скорости; ρ, p, T, c, μ – соответственно плотность, давление, температура, удельная теплоемкость, молекулярная

вязкость смеси; μ_t , Sc_t – турбулентная вязкость газа и турбулентное число Шмидта ($Sc_t=0,9$); C_j – концентрации компонентов; Pr , Pr_t – молекулярное и турбулентное ($Pr_t=0,9$) числа Прандтля; M_j – молекулярный вес компонентов смеси; R_0 – универсальная газовая постоянная; β, J – стехиометрический коэффициент и скорость горения газообразного топлива, которая согласно закону Магнуссена лимитируется химической скоростью реакции и скоростью турбулентной диффузии реагентов:

$$J = \min(J_{ch}, J_{daf}), J_{ch} = k_{ch} \rho^2 C_{gas} C_{O_2} \exp\left(-\frac{E}{R_0 T}\right), \quad (9)$$

$$k_{ch} = 10^{10} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с},$$

$$J_{daf} = \min\left[4C_{gas}, \frac{4C_{O_2}}{\beta}, \frac{2(C_{H_2O} + C_{CO_2})}{1+\beta}\right] \frac{\rho \varepsilon}{k}, \quad (10)$$

$$E = 15300 \text{ кДж/моль}.$$

Для описания турбулентных характеристик газа используется двухпараметрическая « k - ε » модель турбулентности Лаундера и Сполдинга:

$$\frac{\partial \rho k U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{1,0} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + C - \rho \varepsilon, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{1,3} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + 1,44 G \frac{\varepsilon}{k} - 1,92 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (12)$$

$$\mu_t = 0,09 \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, G = \left[\mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j}. \quad (13)$$

где k, ε – кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации; δ_{ij} – символ Кронекера; q_i^{rad} – компоненты вектора радиационного теплового потока.

Радиационный теплообмен моделировался в рамках P1- приближения метода сферических гармоник. Выбор такого подхода для моделирования термического излучения в топочной камере на газообразном топливе обусловлен его хорошей совместимостью с конечно-разностными методами.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{3k_e} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) = -a(4\sigma T^4 - H); \quad (14)$$

$$\frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} = a(4\sigma T^4 - H), \quad (15)$$

где H – пространственная плотность падающего излучения, Вт/м²; $k_e = a$ – коэффициент ослабления среды, 1/м; a – коэффициент поглощения, 1/м; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для входных границ использовались однородные распределения для всех характеристик. В качестве граничных условий на стенках канала использовались условия прилипания для скорости, граничные условия первого рода для температуры газа, равенство нулю производной по нормали для концентраций компонентов газа.

Численная реализация математической модели, описывающей процессы аэродинамики, теплообмена и горения в объеме топки, осуществлялась с использованием специализированного пакета прикладных программ FIRE 3D, разработанного на кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок теплоэнергетического факультета ТПУ, который в данной работе адаптирован к малогабаритной топке объекта исследования.

В третьей главе представлены результаты исследования состояния испарительных поверхностей нагрева.

Обследование, проведенное на типичном котле, свидетельствует, что экранные трубы работают в сложных эксплуатационных условиях. По результатам диагностики большинства экранных труб можно констатировать удовлетворительное их состояние. Однако наряду с этим обнаружены зоны разрушений труб солевого отсека испарения.

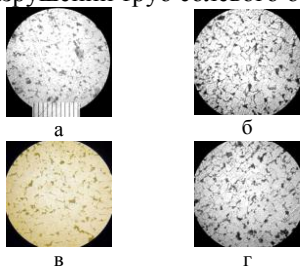


Рис. 1. Структура образцов при металлографическом анализе а) Образец №1 (x300); б) Образец № 5 (x500); в) Образец № 3 (x500); г) Образец № 4 (x500)

По результатам визуально-измерительного контроля для металлографического анализа были подготовлены специальные образцы из предварительно вырезанных участков труб солевого контура циркуляции (три с левого и два с правого экрана): образец №1 – труба №6 левого экрана, образец №2 – труба №13 левого экрана, образец №3 – труба №28 правого экрана, образец №4 – труба №21 правого экрана, образец №5 – труба №18 левого экрана. Структура материала трубы, наблюдаемая при 300- и

500-кратном увеличении, показана на рис. 1. Состояние трубной стали из зоны разрушений указывает на регулярный и достаточно длительный перегрев материала труб.

В снятых с экранных труб отложениях после предварительной подготовки были определены компоненты их химического состава: SiO_2 – 42,3 %, Fe_2O_3 – 13,4%, Al_2O_3 – 4,5%, CaO – 26,5%, MgO – 6,4%, SO_3 – 3,2%, CuO , ZnO , PO_4 – не более 3,7%. Такой состав отложений позволяет предполагать, что в процессе формирования накипеобразователей участвуют технологические минеральные примеси, необходимые в основном производстве, которые, очевидно, попадают в котел с оборотной водой.

Рентгеновская дифрактограмма, представленная на рис. 2, свидетельствует о наличии в составе отложений четырех основных кристаллических образований: гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$; сильно выраженного магнетита – маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; мелилита $\text{Ca}_2(\text{Al,Mg,Si})\text{Si}_2\text{O}_7$ в виде твердого раствора геленита $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ с окерманитом $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$; разновидности калиевого полевого шпата, называемой адуляром KAlSi_3O_8 .

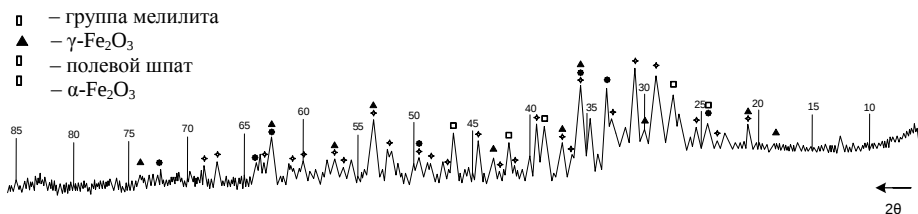


Рис. 2. Рентгенограмма внутритрубных отложений

Свойства выявленных минералов позволяют установить природу имевшихся в воде технологических производственных примесей и их физико-химических превращений. На основе структурно-фазового анализа внутритрубных отложений сделан вывод, что температура стенки трубы составляла 400...450...480...590 °С а в отдельных случаях и до 650 °С.

Присутствующие на внутренней стороне труб отложения, химический состав и минералогические формы свидетельствуют о протекании в экранных трубах накипеобразования, которое локализуется в ограниченной зоне экранных труб в области на уровне оси верхней горелки и является также следствием перегрева труб. Минералогический состав окристаллизованной фазы внутритрубных отложений подтверждает данные металлографических исследований о значительном повышении температуры стенки труб с огневой стороны, имевшем место при эксплуатации котла.

Результаты тепло-гидравлических расчетов циркуляции в виде зависимости расхода воды от паропроизводительности котла представлены на рис. 3. Видно, что при стационарной работе контура циркуляции в широком диапазоне паропроизводительности котла от 2,22 до 5,75 кг/с (соответствует нагрузкам от 40 до 103 %) расход воды изменяется не более чем на 4,8 кг/с при рабочем давлении 1,57 МПа и 1,1 МПа. При давлении 0,63 МПа изменение расхода воды даже не превышает 3,3 кг/с. Особо следует

отметить, что при минимальной паропроизводительности 2,22 кг/с (8,0 т/ч) расход воды составляет не менее 22,4 кг/с, что соответствует скорости циркуляции 0,86 м/с.

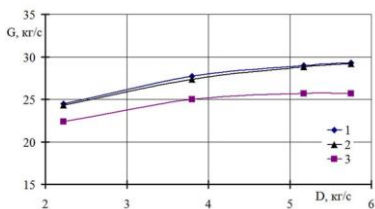


Рис. 3. Зависимость расхода воды в солевом контуре циркуляции от паропроизводительности котла при различном рабочем давлении: 1 – 1,57 МПа, 2 – 1,1 МПа, 3 – 0,63 МПа

опрокидывание в контуре в широком диапазоне стационарных нагрузок котла и рабочего давления.

Выполнены исследования внутритопочных процессов при номинальной нагрузке. Определен характер изменения температурного поля, падающего теплового потока к испарительной поверхности, концентрации кислорода в объеме топки, а также в пристенной области.

Визуализация (рис. 4) тепловых потоков по плоскостям в продольном сечении по осям горелок и в пристеночной области выявила хорошо очерченную зону максимума, расположенную на уровне средней высоты расположения горелок. При этом основная часть этой зоны проецируется на экранные трубы солевого отсека испарения, включенного в крайнюю боковую панель.

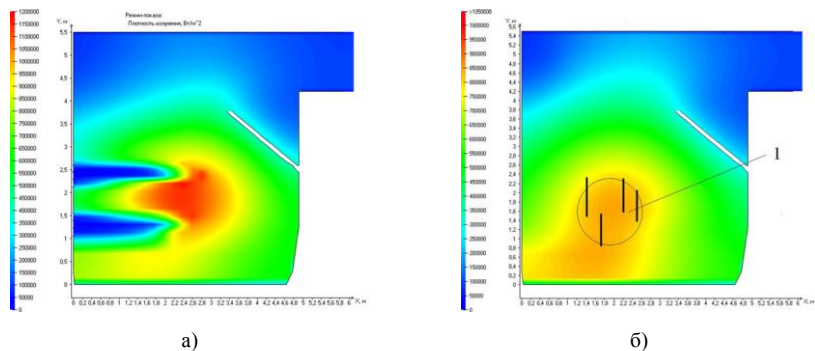


Рис. 4. Тепловой поток в продольных сечениях: а) по осям горелок ($z = 1,365$ м); б) вблизи боковой стены ($z = 0,069$ м); 1 – зона повреждений экранных труб

Установлено, что зона максимального теплового потока совпадает с зоной разрушений и повреждений экранных труб, выявленных при техническом обследовании поверхностей нагрева. Это дает основания для использования величины теплового потока и координаты зоны его максимальной локализации для сравнения с условиями работы экранных труб с целью возможного прогнозирования скорости наклепобразования и обоснования критериев работоспособности экранов.

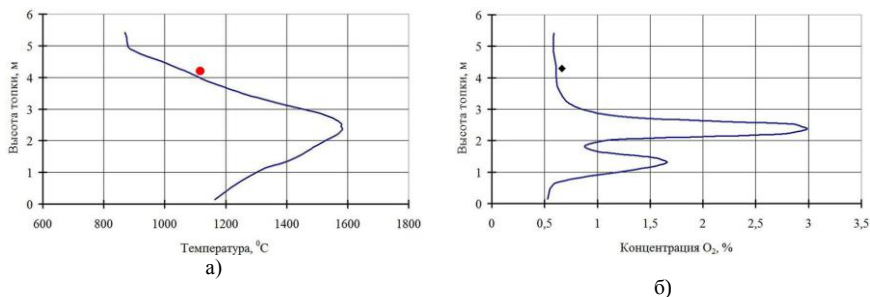


Рис. 5. Изменение температуры дымовых газов и концентрации кислорода по высоте топки: а) температура дымовых газов; б) концентрация кислорода; — численное моделирование; ● — тепловой расчет по нормативному методу; ◆ — инструментальное измерение

На рис. 5 представлены распределения температуры дымовых газов и концентрации кислорода по высоте топки, полученные при численном моделировании. Здесь же показаны в виде точек: значение температуры на выходе из топки (рис. 5,а), определенное тепловым расчетом топки, а также измеренное при наладочных балансовых испытаниях котла значение содержания кислорода в дымовых газах (рис. 5,б). Можно отметить, что результаты численного моделирования отличаются от результатов, полученных на основе нормативного метода для температуры на выходе из топки, всего на 23 °С, что составляет не более 2,2 % (рис. 5,а). Концентрация кислорода на выходе из топки по результатам численного моделирования топочной среды и данные прямого измерения имеют относительное отклонение менее 14,3 % (рис. 5,б).

Полученные результаты показывают, что подходы к решению численных задач, реализованные в используемом пакете прикладных программ FIRE 3D, имеют достаточно высокую достоверность при моделировании физических процессов при сжигании газообразного топлива в малогабаритной камерной топке.

В четвертой главе выполнен анализ изменения теплофизических параметров топочной среды при различных эксплуатационных условиях

работы котла и оценено влияние режимных нагрузок на их особенности. Для оценки и сравнительного анализа внутритопочных процессов определены основные режимы эксплуатации котла от номинальной (100 %) до глубокого минимума нагрузки (15 % от номинальной). При этом рассматривались различные варианты нагружения горелок: равномерное включение двух установленных горелок или работа одной горелки в выбранном режиме работы.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод по характеру внутритопочных процессов. При этом результаты моделирования позволяют сделать и количественные оценки по всем параметрам, характеризующим процессы в топке котла.

Для создания методических основ для прогнозирования эксплуатационной надежности использованы данные, которые были получены в рамках настоящей работы при исследовании физического состояния экранных труб и моделировании теплофизических параметров топочной среды. На рис. 6 показана зависимость изменения перепада плотности излучения в пристеночной области для групп поврежденных труб.

На рис. 6 областью А обозначены границы достоверно установленных участков труб с разрушениями и дефектами, несовместимыми с дальнейшей эксплуатацией. Область Б определяет фактический эксплуатационный перепад плотности излучения в пристеночной области топки $[\Delta q]$, недопустимых при надежной работе экранов.

Параметр $[\Delta q]$ выступает в качестве одного из подтвержденных практикой критериев надежной работы экранов как в применении к задачам эксплуатации и наладки, так и на стадии конструкторской проработки:

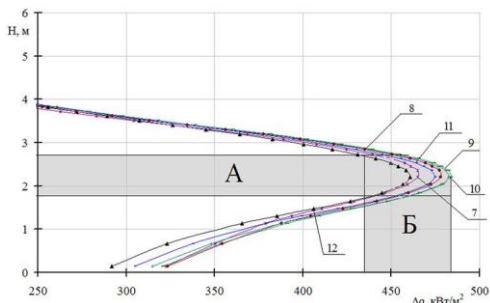
$$[\Delta q] \geq k \cdot \Delta q$$

где Δq и $[\Delta q]$ – соответственно рабочее и предельное значения эксплуатационных перепадов радиационного теплового потока в пристеночной области топки; k – коэффициент, соответствующий запасу надежности. Ориентируясь на нормативную методику¹, можно принимать $k=1,1$ (1,2). При этом меньшее значение относится к котлам, задействованным только на отопительную нагрузку (со сравнительно меньшей динамикой изменения), большее – к котлам, обеспечивающим технологические потребности промышленного производства, динамика изменения производительности которых диктуется этим производственным циклом.

В условиях эксплуатации надежность испарительных элементов котла зависит от большого количества факторов, которые оказывают прямое или косвенное влияние. Так, скорость накипеобразования на внутренней поверхности труб обусловлена качеством питательной воды на входе в котел, величиной непрерывной продувки, содержанием продувочной воды,

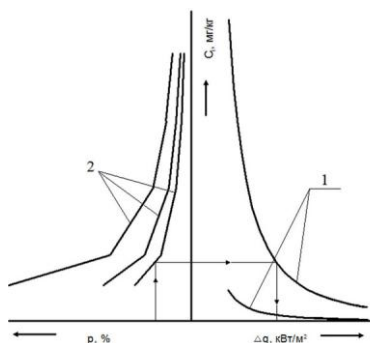
концентрацией накипеобразующих соединений в котловой воде. Комплексная оценка этих факторов, основанная на известных значениях падающего теплового потока в пристенной области, создает возможности для прогноза скорости накипеобразования, а также оценки допустимого перепада теплового потока при изменении режима работы котла и вариантов нагружения горелок. Методическая основа такого рода оценки поясняется номограммой, представленной на рис. 7.

Рис. 6. Изменение эксплуатационного перепада теплового потока в пристеночной области по высоте топки для дефектных участков бокового экрана: 7...12 – группы поврежденных труб; А – область локализации разрушений по высоте; Б – интервал опасных значений перепада теплового потока



Результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают основные причины разрушения экранных труб и обозначенные основные направления повышения их надежности.

Рис 7. Структура номограммы для оценки эксплуатационных условий работы испарительных экранов топочной камеры: p – величина продувки котловой воды из солевого отсека, %; C_i – содержание i -того накипеобразователя в котловой воде, мг/кг; Δq – перепад плотности излучения в пристеночной области, кВт/м²; 1 – скорость накипеобразования, мг/см²·ч; 2 – концентрация примесей в питательной воде, мг/кг



На современном этапе решения обсуждаемой проблемы появилась возможность все намеченные ранее направления по повышению надежности испарительных элементов более детально конкретизировать. Так, посредством математического моделирования можно количественно оценить изменение тепловыделения в зоне расположения испарительных элементов и из большого ряда рекомендаций выбрать самое эффективное решение. Возможности современного подхода позволяют достоверно и в короткий срок выполнить анализ внутритопочных процессов, в том числе и оценить

интенсивность тепловыделения в пристенной области вблизи испарительных элементов при различных вариантах компоновки и режимов нагружения горелок. Кроме этого, при использовании численного моделирования возникает возможность отследить изменения положения зоны максимума тепловых потоков в условиях варьирования расходных параметров работающих горелок и таким образом подобрать оптимальный топочный режим, а также обеспечить эффективную наладку горелочных устройств.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен комплексный анализ условий теплопередачи, определяющих причины разрушений испарительных элементов в двухбарабанных циркуляционных системах, определены основные варианты сочетания причин, определяющих разрушения.
2. Проведены полномасштабные исследования внутритопочных процессов с целью оценки характеристик изменения температурного поля, падающего теплового потока, концентрации кислорода и других критериев в объеме топки, а также в пристенной области. При этом способ выбранного анализа теплофизических процессов позволяет сократить трудоемкость и время проведения данных исчислений.
3. Выполнены исследования по оценке эксплуатационных условий работы солевого контура циркуляции двухбарабанных систем, экспериментально определены основные причины и сопутствующие факторы разрушения экранных труб. Также выполнена оценка условий циркуляции в испарительных элементах.
4. При использовании программного пакета FIRE 3D выполнена оценка перепада теплового потока в пристеночной области и выявлены наиболее опасные участки испарительных элементов с учетом эксплуатационных факторов.
5. На основе применения численного моделирования топочной среды для промышленных двухбарабанных котлов разработана методика прогностической оценки надежности испарительных поверхностей нагрева.
6. Результаты диссертационного исследования используются в ОАО «Бийский котельный завод» (г. Бийск, Алтайский край) и Филиал ФГУП «НПО «МИКРОГЕН» МЗ РФ в г.Томск «НПО «ВИРИОН» (г. Томск), а также используются в учебном процессе по специальности 140502 «Котло- и реакторостроение» в Томском политехническом университете (включены в лекционный курс и лабораторный практикум по дисциплине «Надежность, эксплуатационные режимы, исследование и наладка котельных установок», в тематику выпускных

квалификационных работ и учебно-исследовательской работы студентов).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В., Казаков А.В., Привалихин Г.К. Резервы повышения эффективности работы подпитки котлов первой очереди котельной «ТНХЗ» / Материалы докладов VII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ИПФ ТПУ, 2001. – Т. 2. – С. 36–38.
2. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В. Особенности эксплуатационных режимов модернизированной горелки РГМГ – 2 котла ДСЕ-2,5-14 / Материалы докладов региональной научной конференции «Наука. Техника. Инновация». – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2002. – Ч.2. – С. 185–187.
3. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В. Особенности водоподготовки котельной ОАО «Завод ЖБК-100» г. Томска / Материалы докладов региональной научной конференции «Наука. Техника. Инновация». – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2002. – Ч. 2. – С. 195–197.
4. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В. Проблемы пуско-наладочных работ на установке ВПУ-6 котельной п. Мельниково Томской области / Материалы докладов региональной научной конференции «Наука. Техника. Инновация». – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2002. – Ч. 2. – С. 198–199.
5. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В., Казаков А.В., Привалихин Г.К. Повышение эффективности работы подпитки котлов первой очереди котельной «ТНХЗ» / Труды VII Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». – Томск: Изд. ИПФ ТПУ, 2002. – С. 85–87.
6. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В., Привалихин Г.К. Проблемы водно-химического режима котлов БКЗ-75-39ГМА котельной «ТНХЗ» / Материалы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ИПФ ТПУ, 2003. – Т. 1. – С. 196–198.
7. **Тайлашева Т.С.,** Корженко А.В. Влияние условий непрерывной продувки на качество и надежность водно-химического режима паровых котлов БКЗ-75-39 ГМА котельной ОАО «ТНХЗ» / Труды X Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, ассистентов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд. ИПФ ТПУ, 2004. – Т. 1. – С. 23–24.

8. **Тайлашева Т.С.,** Артамонцев А.И., Привалихин Г.К. Оценка технической целесообразности вариантов реконструкции системы ХВО котельной ООО «Томскнефтехим» / Материалы докладов VI Всероссийского совещания «Энергосбережение, энергоэффективность и энергетическая безопасность регионов России». – Томск: Изд. ЦНТИ, 2005. – С. 19–24.
9. **Тайлашева Т.С.,** Лебедев Б.В. Особенности эксплуатации котлов ДКВР-20-23 ЗАО «Сибкабель» / Материалы III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики». – Екатеринбург: Изд. «ИРА УТК», 2007. – С. 319–323.
10. **Тайлашева Т.С.** Особенности работы циркуляционного контура соленого отсека котла ДКВР-20-23 / Материалы Всероссийской научной конф. студентов и аспирантов «XXXVII неделя науки СПбГПУ». – СПб: Изд. Политехн. ун-та, 2008. – С.144–145.
11. **Тайлашева Т.С.,** Гиль А.В., Лебедев Б.В. Математическое моделирование аэродинамики и горения природного газа в котле типа ДКВР / Материалы V семинара вузов Сибири и Дальнего Востока «Проблемы теплофизики и теплоэнергетики». – Иркутск: Изд. ИрГТУ, 2008. – С.97–101.
12. **Тайлашева Т.С.** Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа / Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 4, Т. 314 – С. 42–47.
13. **Тайлашева Т.С.** Эксплуатационные условия работы соленого циркуляционного контура котла ДКВР -20 / Труды XV Международной научно-практической конференции студентов, ассистентов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд. ИПФ ТПУ, 2009. – Т. 3. – С. 338–340.
14. **Тайлашева Т.С.** Исследование эксплуатационных условий испарительных элементов в двухбарабанных котлах с целью повышения надежности/ Тезисы докладов всероссийского семинара кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике. – Новосибирск: Изд. ИТ СО РАН, 2009. – С. 105.
15. Заворин А.С., **Тайлашева Т.С.** Теплофизические факторы эксплуатационной надежности испарительных элементов двухбарабанных котлов / Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 4, Т. 315 – С. 10–15.

Подписано к печати «___»_____ 2009 г.
Формат 60 х 84 / 16 . Бумага офсетная.
Плоская печать. Усл. печ.л._____.
Уч.- изд. л. _____ Тираж 100 экз.
Заказ № _____. Цена свободная.
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18.08.94 .
Типография, 634034, Томск, пр. Ленина, 30.

