

А. А. ВАЛЬКЕ¹
В. А. ЗАХАРЕНКО¹
Д. Г. ЛОБОВ¹
Д. Б. ПОНОМАРЕВ¹
А. Г. ШКАЕВ¹
М. Ю. НИКОЛАЕВ¹
С. В. ЛУКУТА²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск
²АО «ТГК-11»,
г. Омск

ИНФРАКРАСНЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Данная работа посвящена задаче инфракрасного мониторинга температуры металла поверхности труб пароперегревателей. Мониторинг реализуется на основе инфракрасных камер, осуществляющих бесконтактный контроль температуры поверхности труб настенного пароперегревателя. Приведены результаты моделирования распределения температуры вдоль трубы настенного пароперегревателя при наличии загрязнения и без. Выполнен расчет количества инфракрасных камер, необходимого для осуществления инфракрасного мониторинга поверхности труб пароперегревателей. Разработанные конструкторские решения по месту монтажа инфракрасных камер на котле типа ТП-82 подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: пароперегреватель, инфракрасная камера, металл труб пароперегревателя, котлоагрегат, визуализация температуры, переходный режим.

Введение. Одной из проблем, возникающих на ТЭЦ при эксплуатации котлов барабанного типа, являются повреждения труб настенных пароперегревателей, вызываемые их перегревом в процессе пуска котла. Следует отметить, что термодинамические процессы, протекающие в топке котла, до сих пор ещё недостаточно изучены. При этом оперативный термический контроль металла труб настенного пароперегревателя в процессе эксплуатации может производиться только усредненно и точно на выходе теплоносителя из настенного пароперегревателя посредством термодатчиков, а выявление потенциально опасных повреждений на всех трубах настенного пароперегревателя производится только при визуальном внешнем осмотре поверхностей нагрева во время остановки котла [1–4].

Поэтому актуальной задачей является разработка средств инструментального контроля тепловых процессов на поверхностях пароперегревателей в реальном времени. Наличие такого контроля позволило бы оперативно выявлять недопустимые температурные градиенты и теплонапряжённости на поверхности труб пароперегревателя и предот-

вращать аварийные ситуации, связанные с повреждениями труб настенного пароперегревателя в процессе пуска котла [5, 6]. Цель работы — создание системы контроля за температурным состоянием металла пароперегревателей в переходных режимах котлоагрегатов типа ТП-82 Омской ТЭЦ-3.

Постановка задачи. При проведении патентных исследований было проанализировано 65 патентов на изобретения и полезные модели Российской Федерации, три свидетельства о регистрации программных продуктов, статьи из периодической печати. Проведён ретроспективный обзор результатов интеллектуальной деятельности в области разработки методов и средств теплового контроля поверхностей как труб пароперегревателей, так и экранных труб топок котлов за период более 30 лет. По результатам ретроспективного обзора за 30 лет было установлено, что только на некоторых станциях прошли опытную апробацию системы теплового контроля и диагностики экранных труб [7, 8]. Для контроля тепловых режимов работы экранных радиаторов применяют радиометрические и температурные вставки [9]. В представлен-

ной работе предлагается для теплового контроля состояния металла поверхностей труб настенного пароперегревателя применение бесконтактного теплового контроля в реальном времени без останова работы котла.

Предлагаемый способ реализуется на основе инфракрасных камер, осуществляющих бесконтактный контроль температуры поверхности труб настенного пароперегревателя (НПП). По результатам анализа причин повреждаемости настенных пароперегревателей и конструкции топки котла типа ТП-82 потребовалось определить характеристики и место установки инфракрасных камер.

Теория.

1. Анализ причин повреждаемости настенных пароперегревателей в условиях работы поверхностей нагрева в переходных режимах.

Тепловые разрушения труб пароперегревателей являются одной из основных проблем для эксплуатации. Очевидно, что причиной разрушений являются чрезмерные термические напряжения металла труб, возникающие как вследствие одностороннего лучистого обогрева труб факелами, так и ещё по ряду причин [1, 2, 5, 10, 11], по которым может нарушиться циркуляция в настенном пароперегревателе, что приведёт к аварийному перегреву металла, например, недостаточный пропуск арматуры в связи с попаданием шлама в процессе продувки или из-за солевых отложений, конструктивные дефекты и др.

При пусках котлоагрегата в нижних участках настенного пароперегревателя может происходить обильная конденсация пара, что приведёт к закупорке отдельных труб и целых панелей, а это ведёт к опасному повышению температуры металла закупоренных труб или панелей в районе амбразур горелок. Трубы обычно повреждены с лобовой части, здесь заметно утонение стенки (примерно на 0,25-ой части периметра) вследствие ползучести металла и активного окалинообразования. В результате одностороннего интенсивного нагрева металл лобовой части труб обычно деформирован (несколько «выпучен»), чем отчасти объясняется уменьшение толщины стенки с обогреваемой стороны. Диаметр трубы обычно увеличен на 3–5 %, место утонения стенки имеет трещины, которые встречаются как в поперечном, так и в продольном направлениях. Это свидетельствует о наличии в процессе эксплуатации малоцикловых циклических нагрузок при пусках, остановах и в аварийных ситуациях.

Односторонний радиационный обогрев от мазутного факела в период пуска котла приведёт к возникновению термических напряжений, превышающих напряжения от внутреннего давления воды [1, 4, 7].

Аксиальные термические напряжения σ_t в трубах, сжимающие металл по лобовой (радиационной) стороне, определяются разностью температур в сечении и увеличиваются с ростом плотности теплового потока и со снижением интенсивности теплоотдачи к воде и описываются как:

$$\sigma_t = -(1 - \mu)^{-1} \cdot E \cdot \alpha_L (t_{\text{пов}} - t_{\text{ср}}),$$

где μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости стали; α_L — коэффициент линейного теплового расширения; $t_{\text{пов}}$ — температура стенки трубы по лобовой образующей; $t_{\text{ср}}$ — средняя температура в сечении трубы [9].

Опасность разрушений труб пароперегревателей возрастает при образовании и росте отложений (накипей) в трубах, поскольку имеющие более низкую теплопроводность, чем металл труб, отложения будут образовываться на лобовой (со стороны радиационного нагрева) стороне, что приведёт к перегреву металла, увеличению градиента температурного профиля и росту термических напряжений до предельных значений. При этом термические напряжения могут достигать предела текучести.

В такой ситуации контроль за температурными условиями работы труб пароперегревателей в пусковых режимах приобретает первоочередное значение.

2. Исследования степени теплонпряжённости металла трубы настенного пароперегревателя.

Поставленная в работе задача проведения исследований степени тепловой напряжённости металла труб НПП решалась на основе моделирования в системе ANSYS 17.2 распределения температурного поля по трубе пароперегревателя котла ТП-82.

В основу моделирования в Design Modeler положена геометрическая модель трубы из жаропрочной стали марки 12Х1МФ в соответствии с паспортом на котёл ТП-82.

Геометрическая модель представляет собой трубу длиной 42 метра, диаметром 42 мм и толщиной стенки 4 мм. В соответствии с технической документацией котла ТП-82 теплоноситель имеет следующие параметры: давление теплоносителя 147 кг/см², массовая скорость 828,3 кг/м²·с, температура теплоносителя на входе и выходе трубы

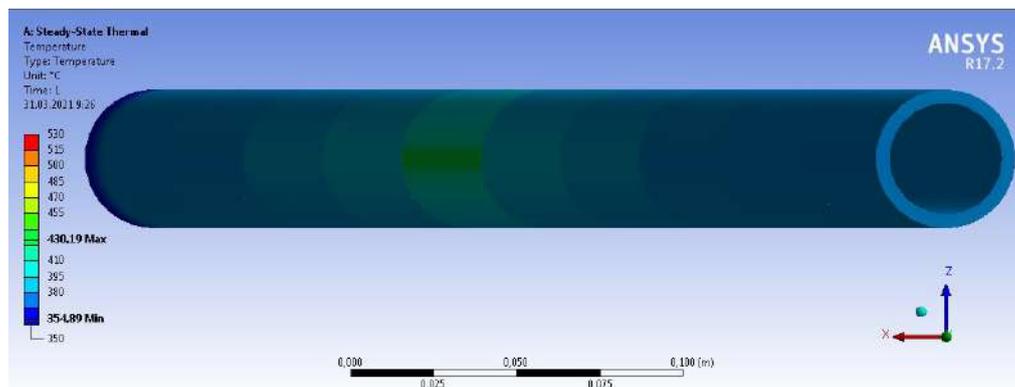


Рис. 1. Распределение температурного поля вдоль трубы НПП

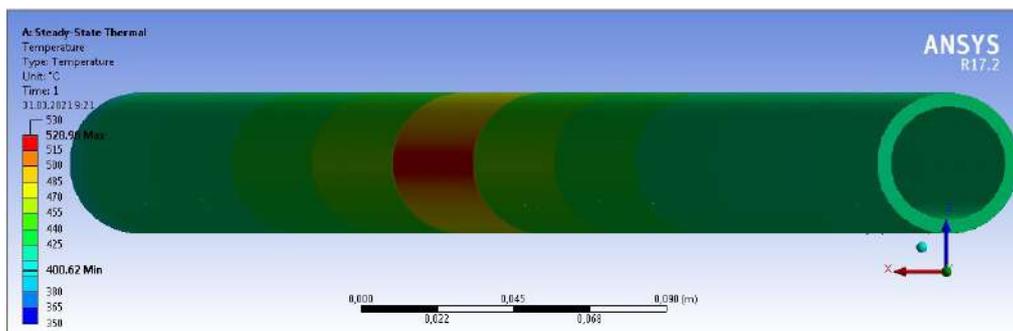


Рис. 2. Распределение температурного поля при загрязнении трубы

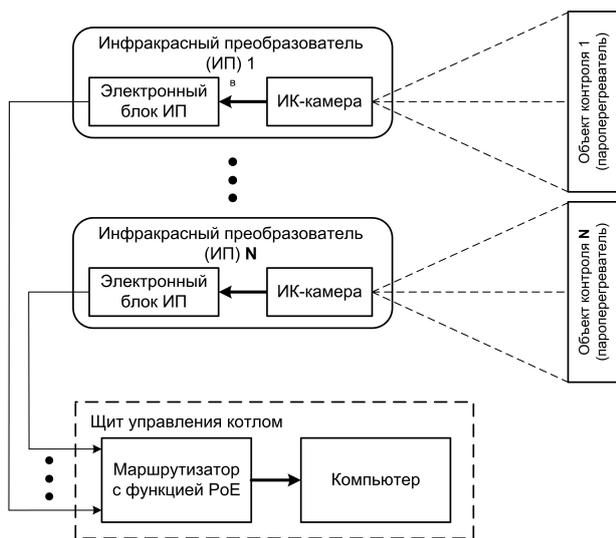


Рис. 3. Структурная схема системы инфракрасного мониторинга

равна 342 °С и 365 °С соответственно. В результате моделирования получено распределение температурного поля трубы без дефектов, вид которого показан на рис. 1. Как видно из температурного профиля на рис. 1, перегрев трубы от факела практически отсутствует.

Как можно видеть из рис. 2, при снижении охлаждения стенки трубы, вызванного, например, загрязнением трубы, снижением давления или другими параметрами температура на поверхности стенки трубы повышается как по всей длине трубы, так и по сечению.

3. *Разработка структурной схемы инфракрасного мониторинга температуры металла поверхности труб пароперегревателей.*

Система инфракрасного мониторинга включает в себя несколько (от 1 до N) инфракрасных преобразователей (ИП), структурная схема представлена на рис. 3. Максимальное число ИП на данном этапе работ ограничено значением $N = 4$, в дальнейшем, при необходимости, оно может быть увеличено.

ИП устанавливаются на внешней стороне стенки котла и визируются через смотровое отверстие в стене на поверхность пароперегревателя, являющуюся объектом контроля. Инфракрасная камера (ИК-камера), входящая в состав ИП, служит для регистрации распределения температур по поверхности пароперегревателя.

Диапазон регистрируемых температур поверхности пароперегревателя в соответствии с техническим заданием составляет от 100 до 600 °С. Для ре-

гистрации таких температур наилучшим вариантом является использование инфракрасных камер, обладающих спектральной чувствительностью в диапазоне (7,5...13) либо (8...14) мкм.

В соответствии с предоставленной технической документацией конструкция настенного пароперегревателя котла типа ТП-82 включает 108 отдельных труб. При условии установки одной ИК-камеры на пароперегреватель её горизонтальное разрешение должно составлять не менее 640 точек, т.к. в этом случае обеспечивается возможность оценки распределения температуры по поверхности каждой отдельной трубы, что позволяет определять наличие различного рода дефектов.

Электронный блок ИП обеспечивает функции удаленного управления ИК-камерой и осуществляет первичную обработку информации о распределении температуры по поверхности пароперегревателя. Кроме того, данный блок обеспечивает сетевое соединение ИП с маршрутизатором на щите управления котлом. При этом электронный блок обеспечивает поддержку технологии PoE и формирует необходимое напряжение питания для инфракрасной камеры.

На щите управления котлом располагаются маршрутизатор и компьютер. Маршрутизатор обеспечивает возможность сетевого соединения со скоростью не менее 100 Мб/с для всех инфракрасных преобразователей. Благодаря поддержке функции PoE имеется возможность питания ИП непосредственно от маршрутизатора через сетевой кабель, что позволяет отказаться от применения дополнительных блоков питания в составе ИП.

Компьютер на щите управления осуществляет окончательную обработку информации о распределении температур по поверхности пароперегревателей, обеспечивает возможность отображения динамики изменения температуры металла как в формате графиков, так и в табличном виде. Отображение может осуществляться как в реальном времени, так и в ретроспективе. Для этого предусмотрена возможность записи в архив всех данных, поступающих от инфракрасных преобразователей. При превышении максимально допустимого значения температуры металла поверхности труб пароперегревателя выдается предупреждающий сигнал.

4. *Расчет необходимого количества инфракрасных преобразователей.*

В ходе анализа конструкции котла ТП-82 был определен технически реализуемый вариант установки инфракрасных преобразователей, позволяющий наблюдать распределение температур по всей поверхности пароперегревателя — это монтаж приборов на заднюю стенку котла ТП-82 между нижней мазутной горелкой и холодной воронкой.

Во-первых, установка ИП ниже мазутной горелки значительно облегчит температурный режим эксплуатации оборудования. Во-вторых, благодаря наличию тяги мазутный факел не должен попадать в поле зрения ИП и мешать наблюдению поверхности пароперегревателя. Для этого в задней стенке должны быть выполнены специальные смотровые каналы.

Для расчета количества инфракрасных преобразователей, необходимого для осуществления инфракрасного мониторинга, был проведен расчет геометрических размеров монтажной арматуры, необходимой для установки ИП на заднюю стенку полутопки котла ТП-82.

Для монтажа ИП в задней стенке котла выполняется визирный канал, в который устанавливается металлический тубус, с закрепленным на нем сканирующим пирометрическим преобразователем. В соответствии с предоставленной АО «ТГК-11» технической документацией расстояние от поверхности пароперегревателя до задней стенки котла L составляет 7550 мм. ИП устанавливается на отметке 6000 мм и визируется под углом на отметку 10000 мм, при этом центр нижней газовой горелки (отметка 10000 мм) будет находиться точно посередине вертикальной зоны обзора сканирующего инфракрасного преобразователя. Таким образом, расстояние от места установки ИП до центра нижней газовой горелки H будет составлять 4000 мм.

Расстояние от места установки тубуса до центра вертикальной зоны обзора ИП составляет:

$$X = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{4000^2 + 7550^2} = 8544 \text{ мм.}$$

В ходе работы изначально рассматривался вариант установки одного ИП на каждой из полутопок котла ТП-82.

В соответствии с предоставленной АО «ТГК-11» технической документацией ширина зоны контроля температуры настенного пароперегревателя котла ТП-82 D составляет 6750 мм. Длина тубуса составляет 250 мм, при этом с целью уменьшения нагрева корпуса ИП он устанавливается на расстоянии 50 мм от крышки тубуса. Таким образом, расстояние B от передней поверхности тубуса до линзы оптической системы ИП составляет 300 мм.

Необходимый угол обзора ИП в горизонтальной плоскости равен:

$$\begin{aligned} \alpha &= 2 \arctg \cdot \left[0,5 \cdot \frac{D}{X + B} \right] = \\ &= 2 \arctg \cdot \left[0,5 \cdot \frac{6750}{8544 + 300} \right] = 41,8^\circ. \end{aligned}$$

Следует отметить, что имеющиеся на рынке инфракрасные камеры, на базе которых может быть реализован ИП, имеют оптические системы, обеспечивающие стандартное значение угла обзора в горизонтальной плоскости, равное 42° . Поэтому, с точки зрения выбора инфракрасной камеры, является возможным вариант установки одной камеры на полутопку котла.

Необходимый минимальный диаметр тубуса в данном случае должен составлять:

$$d = 2B \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) = 2 \cdot 300 \cdot \operatorname{tg}(0,5 \cdot 41,8^\circ) = 229 \text{ мм.}$$

По оценкам специалистов по котельному оборудованию Омской ТЭЦ-3 применение тубуса та-

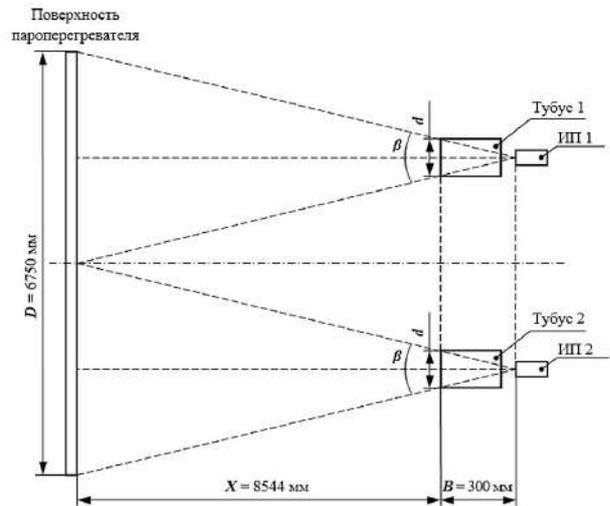


Рис. 4. Иллюстрация варианта установки двух ИП на задней стенке полутопки котла ТП-82

кого диаметра было признано неприемлемым для реализации техническим решением, так как для его обеспечения требуется изгиб шести экранных труб, что является недопустимым изменением конструкции котла.

В результате был предложен вариант, в котором на каждую полутопку устанавливается два инфракрасных преобразователя.

Иллюстрация геометрии в плоскости центра вертикальной зоны визирования ИП для такого варианта установки представлена на рис. 4.

Для проверки возможности технической реализации установки двух инфракрасных преобразователей на одну полутопку котла ТП-82 также были произведены геометрические расчеты требуемых углов обзора ИП в горизонтальной плоскости и внутреннего диаметра тубусов.

Необходимый угол обзора ИП в горизонтальной плоскости β определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta &= 2 \arctg \cdot \left[0,25 \cdot \frac{D}{X + B} \right] = \\ &= 2 \arctg \cdot \left[0,25 \cdot \frac{6750}{8544 + 300} \right] = 21,6^\circ. \end{aligned}$$

Представленные на рынке инфракрасные камеры, на базе которых в данном случае могут быть реализованы ИП, имеют оптические системы, обеспечивающие стандартное значение угла обзора в горизонтальной плоскости, равное 24° . Следовательно, вариант установки двух камер на полутопку котла является технически реализуемым.

Минимальный диаметр тубуса в случае установки двух ИП должен составлять:

$$d = 2B \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) = 2 \cdot 300 \cdot \operatorname{tg}(0,5 \cdot 21,6^\circ) = 115 \text{ мм.}$$

Результаты экспериментов. После анализа полученных результатов расчётов в соответствии с рекомендациями специалистов по котельному оборудованию Омской ТЭЦ-3 был реализован вариант установки тубусов для двух инфракрасных преобразователей на одну полутопку (рис. 3). Тубусы выполнены из стальной трубы с внешним диаметром 159 мм (внутренний диаметр составляет 150 мм).

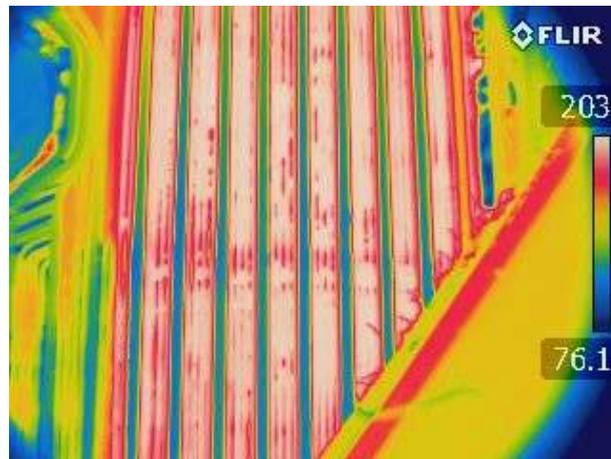
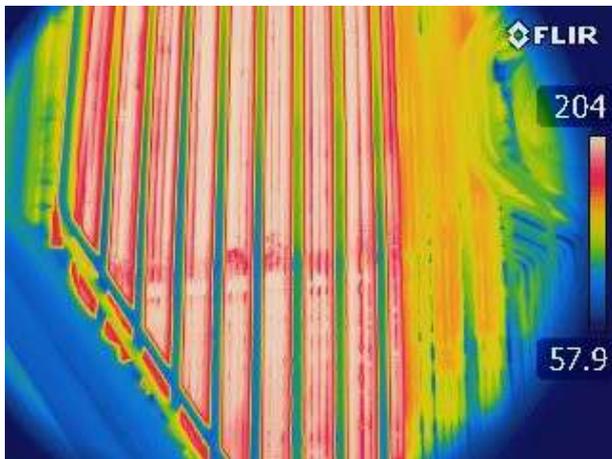


Рис. 5. Термограммы стенки пароперегревателя правой полутопки котла ТП-82 на этапе розжига котла

Для оценки корректности проведенных геометрических расчетов и точности установки тубусов проведен тестовый тепловой контроль при пуске котла посредством переносного тепловизора.

На рис. 5 представлены термограммы стенки настенного пароперегревателя котла ТП-82. Термограммы получены с помощью тепловизора FLIR E60, имеющего угол обзора 25° по горизонтали и разрешение кадра 320×240 пикселей. Как видно по термограммам на рис. 5, все трубы НПП присутствуют в кадре и практически отсутствует отраженное излучение от мазутного факела.

Обсуждение результатов. Из приведенных результатов моделирования распределения температуры вдоль трубы настенного пароперегревателя можно сделать вывод о том, что при измерении температуры на любом участке внешней стенки трубы пароперегревателя можно получать информацию о фактической температуре на поверхности трубы НПП.

Этот вывод положен в основу обоснования места установки ИП перед смотровым люком топki пароперегревателя.

По результатам геометрических расчетов на один котел типа ТП-82 требуется установка четырех ИП с ИК-камерами с углом сканирования по горизонтали $24^\circ - 25^\circ$ и разрешением кадра не менее 320 пикселей. По представленным на рис. 5 экспериментальным термограммам видно, что все трубы НПП попадают в поле зрения ИК камеры и отсутствует отраженное излучение от мазутного факела.

Выводы и заключение. Проведена разработка структурной схемы инфракрасного мониторинга температуры металла с учетом рекомендаций специалистов по котельному оборудованию СП «ТЭЦ-3» АО «ТГК-11». Экспериментально подтвержден разработанный вариант установки инфракрасных преобразователей, позволяющий наблюдать распределение температур по всей поверхности пароперегревателя.

По результатам работы подана заявка в ФИПС на полезную модель «Система контроля температурного режима пароперегревателя топki котла». В ходе работ планируется разработка программного обеспечения для визуализации контролируемого поля температур в виде цветовой палитры и температурных профилей на экране монитора компьютера в режиме реального времени и в ретроспективе.

Библиографический список

1. Артамонов В. В. О признаках эксплуатационных разрушений пароперегревателей под действием перегрева // Контроль. Диагностика. 2010. 163 с.
2. Roy R. K., Das S. K., Panda A. K., Mitra A. Analysis of superheater boiler tubes failed through non-linear heating // Procedia Engineering. 2014. Vol. 86, P. 926–932. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.115.
3. Priymak E. Y., Gryzunov V. I. Special features of behavior of the metal of convection superheater in the process of high-temperature operation // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 53 (3). 2011. 136–140. DOI: 10.1007/s11041-011-9356-4.
4. Haghight-Shishavan B., Firouzi-Nerbin H., Nazarian-Samani M. [et al]. Failure analysis of a superheater tube ruptured in a power plant boiler: Main causes and preventive strategies // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 98. P. 131–140. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.016.
5. Исаев В. А., Коневков А. М. Особенности исследования тепловых и гидродинамических процессов в пароперегревателях паровых котлов // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 11-1(55). С. 104–110.
6. Falahatkar S., Pour-Reza T., Karimi H. The application of radiation shields for thermal control of superheater tubes in boiler // Energy and Power Engineering. 2012. Vol. 4, no. 2. P. 77–84. DOI: 10.4236/epe.2012.42011.
7. Боровский А. В., Герасимов Л. Н., Дружинин С. А. [и др.]. Инфракрасный измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топki // Современные технологии автоматизации. 2000. № 4. С. 70–77.
8. Захаренко В. А., Пономарев Д. Б., Шкаев А. Г. Пирометрический контроль топчного пространства котлоагрегатов ТЭЦ // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 4. С. 207–212.
9. Соколов В. В., Литвинова Л. А. Тепловые нагрузки в топке котла энергоблока 800 МВт при сжигании природного газа // Теплоэнергетика. 1985. № 5. С. 55–58.
10. Макаров А. Н. Аналитическое моделирование факела и теплообмена в печах, топках, камерах сгорания // VI Минский международный форум по теплообмену (Минск, 19–23 мая 2008 г.). Минск, 2008. 13 с.
11. Таймаров М. А., Лавирко Ю. В. Лучистый поток от факела в котлах ТГМ-96 и ТГМЕ-464 // Известия КГАСУ. 2016. № 1. С. 143–149.

ВАЛЬКЕ Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 5219-4823

AuthorID (SCOPUS): E-5132-2014

Адрес для переписки: alex_siberia@mail.ru

ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2501-4655

AuthorID (SCOPUS): 7006028243

ResearcherID: E-5359-2014

Адрес для переписки: zaha_vl@mail.ru

ЛОБОВ Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 369378

AuthorID (SCOPUS): E-6010-2014

Адрес для переписки: dg-lobov@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код РИНЦ: 3054-6265

AuthorID (SCOPUS): 5519010850

ResearcherID: E-5169-2014

ORCID: 0000-0002-5206-0756

Адрес для переписки: dimi3i@mail.ru

ШКАЕВ Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5947-5090

AuthorID (SCOPUS):

ResearcherID: E-5276-2014

Адрес для переписки: Shkayev@mail.ru

НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1649-8920

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

Адрес для переписки: munp@yandex.ru

ЛУКУТА Сергей Владимирович, главный специалист ПТО Технического блока АО «ТГК-11», г. Омск.

Адрес для переписки: lukuta_sv@tgk11.com

Для цитирования

Вальке А. А., Захаренко В. А., Лобов Д. Г., Пономарев Д. Б., Шкаев А. Г., Николаев М. Ю., Лукута С. В. Инфракрасный мониторинг температуры металла поверхности труб пароперегревателей в переходных режимах // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 103–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-103-108.

Статья поступила в редакцию 05.11.2022 г.

© А. А. Вальке, В. А. Захаренко,

Д. Г. Лобов, Д. Б. Пономарев,

А. Г. Шкаев, М. Ю. Николаев, С. В. Лукута