



УДК 536.6

*К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин,
В.Ю. Митяков, В.В. Османов*

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

*К.А. Grigoryev, Yu.A. Roundyguine,
V.Yu. Mityakov, V.V. Osmanov*

DEVELOPMENT AND INDUSTRIAL TESTING OF A THERMAL MEASURING SYSTEM BASED ON GRADIENT HEAT FLUX SENSORS

Разработаны и апробированы зонды на основе градиентных датчиков теплового потока для измерения в камерах сгорания энергетических котлов. Предложена методика и выполнена градуировка зондов на физической модели газоплотного экрана топки, проведены ресурсные испытания зондов при многоцикловом термошоке. Разработаны способы монтажа зондов без нарушения герметичности водопарового тракта котла. Заложены методологические основы градиентной теплотметрии камер сгорания. Создана и успешно опробована система теплотметрии из зондов на паровом котле П-49 сверхкритического давления; приведены результаты промышленных испытаний.

ДАТЧИК ТЕПЛООВОГО ПОТОКА; КАМЕРА СГОРАНИЯ; ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОТЕЛ; ДИАГНОСТИКА ШЛАКОВАНИЯ; ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ.

Developed and tested probes based on the gradient heat flux sensors to measure the combustion chambers of power boilers. Developed a technique and carried out calibration of probes on a physical model of the furnace gas proof shield, held the endurance tests of the probes in multicyclic thermal stress. Developed methods of mounting the probes without disturbing the integrity of the boiler water-steam tract. Methodological foundations of the gradient heat flux measurement in combustion chambers are laid. Developed and successfully tested heat flux measuring system based on the probes in the boiler P-49 with supercritical pressure; there are results of industrial tests.

HEAT FLUX SENSOR; FURNACE; POWER BOILER; DIAGNOSIS OF SLAGGING; INDUSTRIAL TESTS.

Теплотметрия в высокотемпературных условиях камер сгорания — сложная, трудоемкая и дорогостоящая область исследований. Она важна при наладке энергетического оборудования и исследовании процессов (теплообменных, шлакования и др.), влияющих на плотность воспринятого теплового потока. Наибольший интерес вызывает локальное прямое измерение этого потока. Знание локальных значений тепловосприятия топочных экранов в камерах сгорания энергетических котлов необходимо для следующего:

диагностики шлакования, горения топлива, положения факела;

определения неравномерности тепловосприятия стен по ширине, глубине и высоте топки; оценки тепловой эффективности топочных экранов;

совершенствования существующих и разработки новых высокоэффективных технологий сжигания твердого топлива на основе уточненных значений тепловой эффективности топочных экранов.

Разработка недорогих и надежных средств измерения воспринятой плотности теплового потока — чрезвычайно важная и актуальная задача современной топочной теплотметрии.

Существующие методы теплотрии в топках котлов основаны на термометрии, что требует дальнейшего пересчета через характеристики термометрического средства измеренной термо-ЭДС в величину теплового потока. Наибольшее распространение получили переносные термозонды, температурные вставки, калориметры и др. [1].

Прямое измерение плотности теплового потока в топках котлов стало возможным благодаря созданию градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) на основе композитных термостойких материалов (например, никель + сталь 12Х18Н10Т), обладающих анизотропными тепло- и электропроводностью [2]. Работы в этом направлении ведутся с 2007 года на кафедре теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета С.З. Сапожниковым, В.Ю. Митяковым и А.В. Митяковым [3]. Принцип действия ГДТП основан на возникновении термо-ЭДС при прохождении через него теплового потока. Преимущество указанного композита связано с высокой термостойкостью и приемлемой для топочной теплотрии чувствительностью [4, 5]. Данная работа является продолжением комплекса исследовательских работ, начатых на кафедре теоретических основ теплотехники с участием кафедры реакторных и котельных установок применительно к топкам котлов [6, 7].

Первый опыт успешного внедрения ГДТП в промышленную эксплуатацию осуществлен в 2008 году на котле БКЗ-210 ст. № 9 ТЭЦ-4 г. Кирова [8, 9]. Результаты исследований показали принципиальную возможность применения этого типа датчиков в котельной технике и позволили наметить основные требования для создания методологических основ градиентной теплотрии.

Требования к конструктивной реализации градиентной теплотрии предполагают:

- создание измерительных зондов на основе ГДТП с учетом конструктивных особенностей и условий работы в камерах сгорания;
- разработку методики градуировки зондов в условиях близких к внутритопочным;
- разработку методики измерения локального тепловосприятия в топках котлов;
- разработку и создание теплотрической системы на основе зондов с ГДТП, которая име-

ет возможность регистрации, архивирования и анализа результатов измерений.

Измерительный зонд на основе ГДТП должен обеспечивать: приемлемую точность прямого измерения воспринятого теплового потока; высокую надежность в высокотемпературных топочных условиях при многократном использовании аппаратов водяной или паровой обдувки внутритопочных поверхностей; простоту монтажа; возможность быстрой замены без останова котла; минимум искажений теплового состояния топочного экрана; возможность обработки сигналов стандартными методами и приборами; устойчивость к электрическим помехам и наводкам, а также низкую стоимость как самого датчика, так и его градуировки. Для соответствия указанным требованиям ГДТП размещается в специальном корпусе и в совокупности с отводящими электродами образует собственно зонд (см. рис. 1, а).

Наиболее удачным представляется размещение зондов на резьбовом соединении в плавниках экранных труб газоплотных топочных панелей [10]. Это позволяет не нарушать герметичность контура циркуляции котла при монтаже и обслуживать зонды снаружи топки, используя имеющиеся площадки котла [11].

Выбор материалов для изготовления корпуса зонда производился с учетом материала экранной панели и его рабочей температуры, не превышающей 670 К. Корпус зонда (см. рис. 1, б) представляет собой цилиндр диаметром 10 мм из стали 12Х1МФ с резьбой для монтажа и торцевым углублением для ГДТП. Собственно ГДТП фиксируется в корпусе высокотемпературным (до 1800 К) теплопроводным электроизолирующим компаундом, который защищает датчик от механических и коррозионно-эрозионных повреждений. В корпусе выполнены два сквозных отверстия для вывода электродов от ГДТП. Электроизоляторами служат стеклянные микрокапилляры. При выводе электродов за пределы обмуровки котла они помещаются в высокотемпературный кембрик из стеклонити. Тепловой поток воспринимается торцевой поверхностью зонда, проходит через ГДТП и отводится через корпус зонда к плавникам экранных труб (рис. 2). Перед установкой зонда на резьбу наносится графитная смазка.

Разрабатывая систему теплотрии камер сгорания на базе использования зондов с ГДТП для условий сжигания различных видов твердых топлив учтен опыт сжигания сильношлакующих углей, который показал возможность заноса межтрубных плавников золо-шлаковыми отложениями в процессе работы котла. Поэтому предложено вынести торцевую лучевоспринимающую поверхность зонда в плоскость, проходящую через лобовые образующие экранных труб. Для этого со стороны топки на плавники приваривают сухари, в которые на резьбу устанавливают зонды (см. рис. 2). Таким образом, возможны два места монтажа зондов на газоплотных топочных панелях — плавник и сухарь.

Целью градуировки ГДТП без корпуса, как показано в [4, 6], является установление зависимости измеряемой термоЭДС от плотности теплового потока:

$$E_{\text{ГДТП}} = S_0 F_{\text{ГДТП}} q_{\text{ГДТП}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ГДТП}}$ — измеренная термоЭДС ГДТП, мкВ; S_0 — вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мкВ/Вт; $F_{\text{ГДТП}}$ — площадь ГДТП в плане, м²; $q_{\text{ГДТП}}$ — воспринятая датчиком плотность теплового потока, Вт/м².

Ручная сборка зондов влечет конструктивную и технологическую нетождественность, что требует градуировки зондов в рабочем тепловом состоянии и введения поправочных коэффициентов, учитывающих индивидуальные особенности монтажа и изготовления зонда. С этой целью разработана методика градуировки зондов в условиях близких к внутритопочным. В основу градуировки заложено установление зависимости измеренной термоЭДС зонда $E_{\text{зонд}}$, мкВ, от известной плотности воспринятого зондом теплового потока $q_{\text{зонд}}$, Вт/м²:

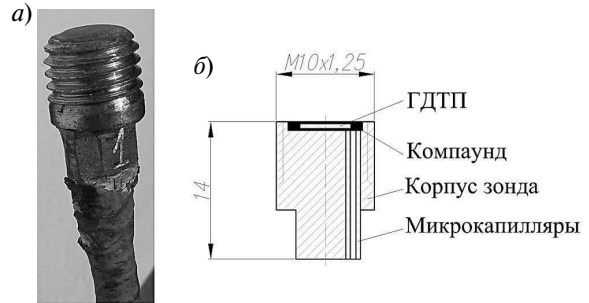


Рис. 1. Зонд на основе ГДТП:
а — внешний вид; б — устройство

$$E_{\text{зонд}} = a q_{\text{зонд}}, \quad (2)$$

где a , мкВ·м²/Вт — индивидуальный коэффициент зонда, учитывающий вольт-ваттную чувствительность ГДТП S_0 , площадь ГДТП $F_{\text{ГДТП}}$, термическое сопротивление слоя компаунда и резьбового соединения зонда, а также способ монтажа. Очевидно, что плотность теплового потока, воспринятая зондом на сухаре, отличается от тепловосприятия зонда на плавнике в силу различных условий облучения и термического сопротивления сварных швов сухаря и плавника. Именно поэтому градуировка сводится к определению индивидуальных коэффициентов, учитывающих расположение зондов на сухаре ($a_{\text{сух}}$) и на плавнике ($a_{\text{пл}}$):

$$a_{\text{сух}} = \frac{E_{\text{зонд сух}}}{q_{\text{зонд}}}; \quad (3)$$

$$a_{\text{пл}} = \frac{E_{\text{зонд пл}}}{q_{\text{зонд}}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{зонд сух}}$ и $E_{\text{зонд пл}}$, мкВ — термоЭДС зонда при установке соответственно на сухаре и плавнике.

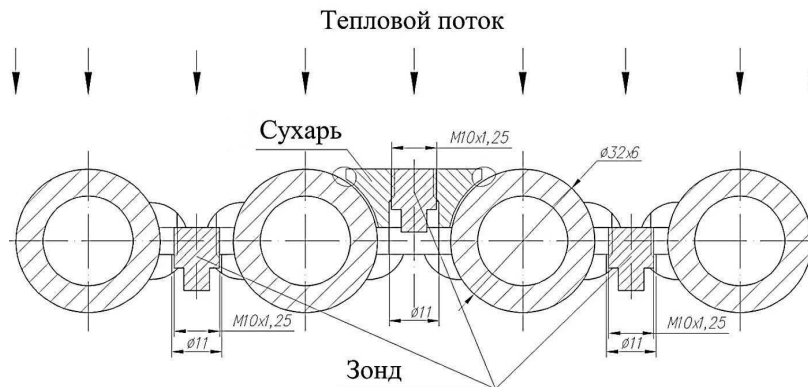


Рис. 2. Градуировочный стенд

Градуировка проводится на физической модели газоплотного топочного экрана. Источником теплоты служит факел при сжигании дизельного топлива. Условия градуировки приближены к внутритопочным, характер теплообмена имеет и радиационную, и конвективную составляющие. Изменение плотности падающего теплового потока осуществляется приближением и удалением факела от физической модели (далее — экрана). Экран изготовлен из труб $\varnothing 32 \times 6$ с шагом 48 мм, материал — сталь 12Х1МФ (см. рис. 2). Размер экрана в плане 176×270 мм. С огневой стороны экрана установлен сухарь и выполнены в плавниках для зондов два отверстия с резьбой.

Плотность воспринятого зондом теплового потока определяется балансовым методом по формуле

$$q_{\text{зонд}} = \frac{G_{\text{в}} c_p (T_{\text{в}}'' - T_{\text{в}}')}{F_{\text{экр}}}, \quad (5)$$

где $G_{\text{в}}$ — массовый расход охлаждающей воды, кг/с; c_p — средняя изобарная теплоемкость воды при температуре 290–373 К, Дж/(кг·К); $T_{\text{в}}'$, $T_{\text{в}}''$ — измеренные с помощью погружных термомпар температуры воды соответственно на входе и выходе из экрана, К; $F_{\text{экр}}$ — площадь огневой поверхности экрана, м². Такой способ определения плотности воспринятого теплового потока учитывает степень загрязнения огневой поверхности экрана и коэффициент теплопередачи от факела к воде, что сводит к минимуму неопределенность градуировки. Подставляя выражение (5) в (3) и (4), получаем зависимость для индивидуальных коэффициентов a в общем виде:

$$a = \frac{E_{\text{зонд}} F_{\text{экр}}}{G_{\text{в}} c_p (T_{\text{в}}'' - T_{\text{в}}')}. \quad (6)$$

Для оценки неопределенности градуировки и получения достоверных метрологических характеристик проведена серия опытов с четырехкратным повторением без демонтажа зондов. При этом влияние резьбового соединения не учитывалось. Неопределенность измерения индивидуальных коэффициентов одинакова и найдена согласно [1] на основе суммарной стандартной неопределенности с учетом выражения (6) при максимально достигнутой воспринятой плотности теплового потока 104 кВт/м²:

$$\Delta a = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} = 1,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{мкВ} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}. \quad (7)$$

Суммарная стандартная неопределенность величин, входящих в выражение (7), находится аналогично. В результате исследований установлено, что индивидуальные коэффициенты a партии зондов укладываются в диапазон 0,004–0,01 мкВ·м²/Вт. Поскольку каждый зонд имеет индивидуальный коэффициент $a_{\text{сух}}$ и $a_{\text{пл}}$, то и неопределенность измерения этих коэффициентов для каждого зонда будет отличаться. Учитывая этот факт, относительную неопределенность измерения индивидуальных коэффициентов нашли для зонда с минимальным значением a , равным 0,004 мкВ·м²/Вт, она не превысила

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a} 100 \% = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}} 100 \% = 3,75 \%. \quad (8)$$

Методика градиентной теплотрии в реальных топочных условиях заключается в определении плотности теплового потока q , Вт/м², воспринятого экраном топки при прямом измерении термоЭДС зонда $E_{\text{зонд}}$, мкВ, в зависимости от способа установки зонда при его известных индивидуальных коэффициентах $a_{\text{сух}}$ и $a_{\text{пл}}$:

при установке зонда на плавнике

$$q = \frac{E_{\text{зонд пл}}}{a_{\text{пл}}}; \quad (9)$$

при установке зонда на сухаре

$$q = \frac{E_{\text{зонд сух}}}{a_{\text{сух}}}. \quad (10)$$

Очевидно, что измерение тепловосприятия топочного экрана зависит от теплопроводности резьбового соединения после монтажа зонда. С целью определения влияния резьбового соединения на показания зондов проведена серия опытов при многократных демонтаже и установке зондов на одно и то же резьбовое соединение.

Относительная неопределенность измерения воспринятого теплового потока зондами с ГДТП (с учетом влияния индивидуальных коэффициентов и резьбового соединения) не превысила 16 %.

Работу зондов в топочных условиях сопрягает регулярное применение аппаратов во-

дяной или паровой очистки топочных экранов, что может оказывать значительное влияние на ресурс зондов. Поэтому проведены ресурсные испытания зондов на водяной термошок, сопровождающийся многоцикловым нагревом-охлаждением. В испытаниях участвовали 6 зондов, в один из которых вмонтирована термопара для контроля температурного уровня зондов. Зонды нагревались газовым пламенем до температуры контрольного зонда 670 ± 20 К. После нагрева на торцевую рабочую поверхность зондов направлялась струя воды при температуре 300 К. Время контакта воды с зондом составляло 0,04 с, что соответствует времени контакта точек топочного экрана с движущейся водяной струей аппарата обдувки. При этом температура зондов в течение 4 с резко снижалась на 250 К. Затем зонды снова нагревались до 670 К, после чего повторялся водяной термошок. В испытаниях проведено 100 циклов нагрева-охлаждения. В итоге было установлено, что исследуемая конструкция и подобранные материалы зондов дают удовлетворительную надежность для топочных условий.

Промышленные испытания системы теплотри на базе ГДТП проведены на котле П-49 Назаровской ГРЭС в период пуско-наладочных работ. Котел П-49 (ст. № 7) — двухкорпусной (корпус А и Б) прямоточный сверхкритического давления с промежуточным перегревом пара — входит в блок 500 МВт. Характеристики котла: тепловая мощность — 740 МВт; давление и температура первичного пара — $p = 25,5$ МПа, $T = 818$ К; паропроизводительность каждого корпуса — 800 т/ч, топливо — назаровский бурый

уголь. Водопаровой тракт каждого корпуса выполнен по двухпоточной схеме (на корпусе А — нитки А и Б, на корпусе Б — нитки В и Г) симметрично относительно оси корпуса. Каждый корпус оснащен десятью мазутными растопочными горелками и двенадцатью пылеугольными (рис. 3). В 2013 году завершено техническое перевооружение этого блока с переводом обоих корпусов котла на низкотемпературную вихревую (НТВ) технологию сжигания. Зонды размещены на правой полутопке (на нитке А) нижней радиационной части (НРЧ) НТВ-топки корпуса А в один ярус на отметке 10,5 м на фронтальной, боковой и задней стенах, а также на боковой стене равномерно по высоте (см. рис. 3).

Места установки зондов выбраны по соображениям их размещения в зонах максимальных температур и возможного шлакования при сжигании твердых топлив в НТВ-топках. С учетом индивидуальной градуировки сигналы от зондов обрабатываются, регистрируются и архивируются в виде плотности теплового потока ($\text{кВт}/\text{м}^2$) с помощью двух модулей аналого-цифровых преобразователей ZET-220. Для защиты сигналов от электрических наводок применены экранированные провода, размещенные в отдельных металлических лотках с крышками. Монтаж зондов, коммутация проводов, настройка и наладка системы теплотри проведена совместно с ООО «Компания НТВ-энерго».

В период промышленных испытаний корпуса А котла П-49 осуществлялась растопка и стационарная работа на мазуте с последующей работой на угольной пыли. При этом на стационарной нагрузке при сжигании мазута

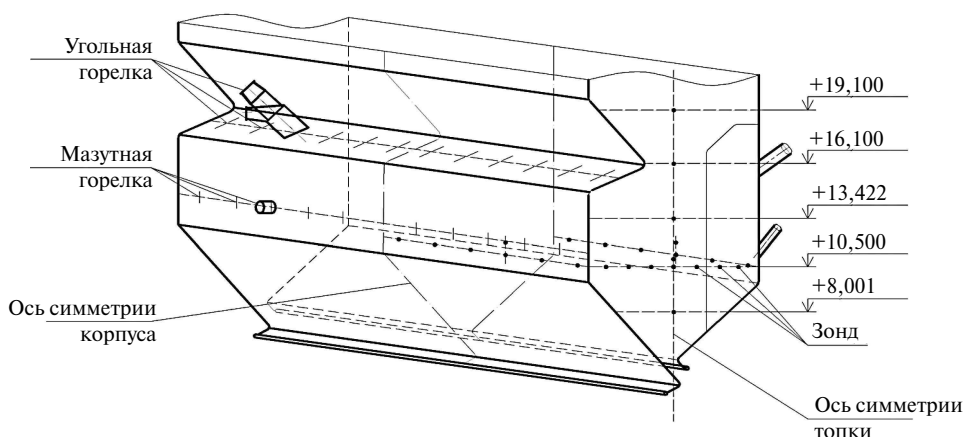


Рис. 3. Схема размещения зондов на стенах топки корпуса А котла П-49

паропроизводительность составляла 30 % от номинальной при работающих восьми мазутных горелках (крайние были отключены), а при сжигании угольной пыли — до 60 %.

На рис. 4 представлены характерные опытные данные по тепловосприятию зондов на фронтальной стене НРЧ по нитке А на отметке 10,5 м. Усреднение результатов измерений проводилось за каждые 20 минут.

Для количественной оценки работы зондов на графике (рис. 4, а) представлены показания отдельных зондов ($q_{\text{зонд } i}$, кВт/м²) и среднее между показаниями этих зондов ($q_{\text{зонд ср}}$, кВт/м²).

Для качественной оценки работы зондов на графике (рис. 4, б) представлена величина $q_{\text{зонд ср}}$, а также среднее тепловосприятие фронтального экрана НРЧ $q_{\text{фр}}$, кВт/м², на котором установлены зонды, тепловая мощность нитки А Q , МВт, с учетом топочных экранов и всей системы пер-

вичного пароперегревателя, тепловая мощность фронтальной стены НРЧ $Q_{\text{фр}}$, МВт, а также средняя температура продуктов сгорания на выходе из топки T''_T , °С.

Величина $q_{\text{фр}}$ рассчитана балансовым методом на основании показаний штатных приборов по формуле

$$q_{\text{фр}} = \frac{D(c_p|_{p'', T''} T'' - c_p|_{p', T'} T')}{F_{\text{фр}}}, \quad (11)$$

где D — массовый расход среды, кг/с; p' , T' и p'' , T'' — давление, МПа, и температура, К, среды соответственно во входном и выходном коллекторах фронтального экрана НРЧ; $c_p|_{p', T'}$, $c_p|_{p'', T''}$ — теплоемкости среды при соответствующих давлении и температуре, Дж/(кг·К); $F_{\text{фр}}$ — площадь фронтального экрана НРЧ, м².

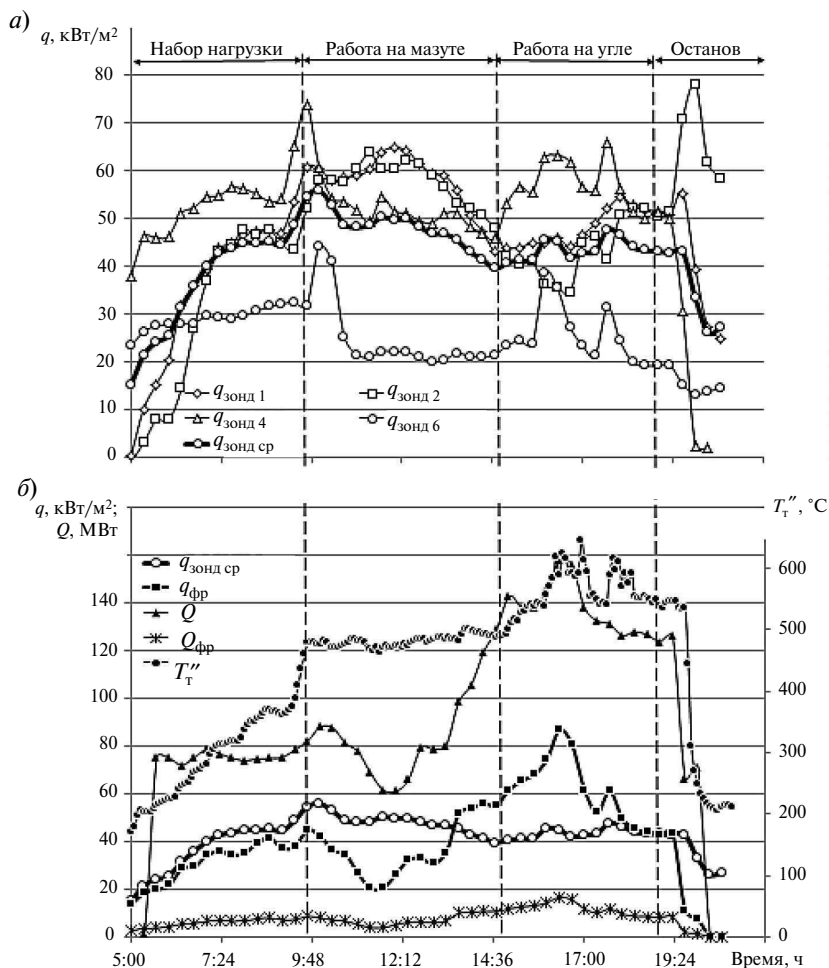


Рис. 4. Результаты промышленных испытаний:

а — показания зондов; б — сравнение показаний зондов с параметрами котла

На рис. 4 можно выделить период набора нагрузки (до времени 09:48), стационарный режим на мазуте (до 14:40), работа на угле (до 19:00) и аварийный останов по причине отключения электрогенератора при срабатывании защиты.

Показания зондов адекватно отражают тепловое состояние топки и изменяются в соответствии с режимными характеристиками котла. Так, в период набора нагрузки поочередно включались мазутные горелки, о чем свидетельствуют различные начальные уровни плотностей теплового потока соответствующих зондов (см. рис. 4, а), которые ко времени установившейся нагрузки на мазуте практически сблизилась. Низкие значения зонда 6 обусловлены тем, что мазутная горелка у правой боковой стены топки была отключена.

В период стационарной работы на мазуте наблюдается неравномерность локального тепловосприятия отдельных зонд фронтального экрана (см. рис. 4, а) относительно среднего по зондам ($q_{\text{зонд ср}} = 49 \text{ кВт/м}^2$). Эти величины измеренных плотностей воспринятого теплового потока, а также соответствующие коэффициенты неравномерности тепловосприятия $\eta_T = q_{\text{зонд } i} / q_{\text{зонды ср}}$ на правой половине фронтальной стены НРЧ представлены на рис. 5. Полученная неравномерность имеет нарастающий характер к центру топки и укладывается в диапазон 0,43–1,28, что согласуется с известными данными, приведенными в [12], по тепловой разверке экранов камерных топков.

При работе на угле (см. рис. 4, а и б) наблюдаются два пика (в 15:40 и 17:20). Они обусловлены увеличением общего расхода топлива, который значительно различался между пылеугольными горелками. Так, все зонды (см. рис. 4, а) отреагировали на это увеличение, а зонды №4 и №6 наглядно демонстрируют неравномерность тепловыделения в топке. Анализ величин $q_{\text{зонд ср}}$ и $q_{\text{фр}}$ показывает, что переходные режимы работы котла сопровождаются резким различием указанных показателей. Это объясняется спецификой геометрии НТВ-топки и организации аэродинамики топочного процесса: доли лучистой и конвективной составляющих сложного теплообмена значительно изменяются по высоте фронтального экрана ввиду различия его облученности и омывания продуктами сгорания из-за фронтального аэро-



Рис. 5. Коэффициенты неравномерности и профиль плотностей воспринятого теплового потока

динамического выступа и активной вихревой аэродинамики в нижней части топки.

Анализ результатов промышленных испытаний показывает, что качественная картина изменения локального тепловосприятия, составленная по показаниям отдельных зондов $q_{\text{зонд } i}$ (рис. 4, а), согласуется с изменениями величин Q , $Q_{\text{фр}}$, а также T_T'' (рис. 4, б). Так, в период набора нагрузки наблюдается монотонный рост указанных параметров; при стационарной нагрузке на мазуте — показатели относительно стабильны; при работе на угле — два всплеска (величина $q_{\text{зонд ср}}$ изменялась примерно на 6 кВт/м^2); после останова — все показатели резко снижаются.

К еще одной возможности зондов можно отнести диагностику шлакования [13]. Снижение показаний зонда при длительной стационарной нагрузке будет свидетельствовать о локальном загрязнении экрана топки в месте установки зонда.

С июля по октябрь 2013 года наработка корпуса А котла П-49 составила более 700 ч, было осуществлено 26 пусков из холодного состояния, при этом все зонды сохранили работоспособность.

В результате промышленных исследований разработаны методологические основы топочной градиентной теплотрии. В ходе ее конструктивной реализации успешно осуществлены такие этапы, как создание измерительных зондов на основе ГДТП применительно к камерам сгорания, разработка методики градуировки зондов в условиях, близких к внутритопочным,

и методики измерений локального тепловосприятия в топках котлов. Результаты промышленной апробации градиентной теплотметрии доказали ее принципиальную работоспособность, высокую надежность, достоверность ре-

зультатов и возможность ее применения в тяжелых высокотемпературных условиях топочных камер. Вместе с тем эта работа позволила наметить пути дальнейшего совершенствования конструкции зондов и методики измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.
2. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 203 с.
3. **Митяков В.Ю., Можайский С.А., Сапожников С.З., Митяков А.В.** Градиентные датчики для высокотемпературной теплотметрии // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34. Вып. 19. С. 1–5.
4. Митяков А.В. Градиентная теплотметрия в теплоэнергетических установках: дис.... д-ра тех. наук: 05.14.04 / Митяков Андрей Владимирович; СПбГПУ. Защищена 06.04.2010 г. СПб, 2010.
5. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Основы градиентной теплотметрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.
6. **Османов В.В.** Градиентные датчики теплового потока для теплотметрии в топках котлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №4 Т. 1(183). С. 100–104.
7. **Сапожников С.З., Григорьев К.А., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Рундыгин Ю.А., Османов В.В.** Диагностика топочных процессов на основе градиентной теплотметрии // Проблемы и совершенствование угольной энергетики: Сб. докл. V научно-практ. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (Челябинск, 7–9 июня 2011 г.). Т. III.— Челябинск: Изд-во ОАО «ИЦЭУ», 2011. С. 249–258.
8. **Османов В.В., Григорьев К.А., Митяков А.В.** Градиентная теплотметрия в вихревой топке модерни-

зированного котла БКЗ-210 // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Матер. докл. VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академika РАН В.Е. Алемасова (Казань, 15–17 сентября 2010 г.). Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010. С. 277–280.

9. **Митяков В.Ю., Османов В.В.** Градиентная теплотметрия в радиационном и сложном теплообмене // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях: Тез. докл. XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. академика А.И. Леонтьева, Звенигород, 23–27 мая 2011.

10. **Пат. Российской Федерации на полезную модель 96654.** Датчик теплового потока / В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, А.В. Митяков, К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, В.В. Османов. № 2010115436/28. Заявлено 19.04.2010. Опубл. 10.08.2010. Бюл. № 22.

11. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Османов В.В.** Разработка градиентных датчиков теплового потока для теплотметрии в камерах сгорания. Горение твердого топлива: Тез. докл. VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 ноября 2012 г. (CD).

12. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

13. **Османов В.В., Глушков Д.О., Брикман И.А., Чернецкий М.Ю.** Экономическая оценка внедрения градиентных датчиков теплового потока для теплотметрии в камерах сгорания // Всероссийский журнал научных публикаций. 2013. № 5. Т. 15. С. 43–45.

REFERENCES

1. **Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeev A.A.** Thermal testing of boilers. M.: Energoatomizdat, 1991. 416 p. (rus.)
2. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Gradient heat flux sensors in the heat engineering experiment. Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2007. 203 p. (rus.)
3. **Mityakov V.Yu., Mozhayskiy S.A., Sapozhnikov S.Z., Mitiakov A.V.** Gradient sensors for high temperature heat flux measurement. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2008. Vol. 34. Iss. 19. P. 1–5. (rus.)

4. **Mityakov A.V.** Gradient heat flux measurement in the thermal power plants: diss. ... Dr. Tech. Science: 05.14.04: protected 06.04.2010 / Mityakov Andrey Vladimirovich; SPbSTU. St. Petersburg, 2010. (rus.)

5. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Basics of the gradient heat flux measurement. Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2012. 203 p. (rus.)

6. **Osmanov V.V.** Gradient heat flux gauges for measurement in industrial boiler furnaces. *Scientific and tech-*

nical sheets of SPb GPU. 2013. №4(183), Vol. 1. P. 100–104. (rus.)

7. **Sapozhnikov S.Z., Grigoryev K.A., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Roundyguine Yu.A., Osmanov V.V.** Diagnosis of combustion processes based on gradient heat flux measurement. *Problems and improvement of coal power: Proceedings of the V Scientific Conference «Mineral part of the fuel, slagging, cleaning boilers, capture and utilization of ash»* (Chelyabinsk, 7–9 June 2011). V. III.— Chelyabinsk OJSC «ICEU», 2011. P. 249–258. (rus.).

8. **Osmanov V.V., Grigoryev K.A., Mityakov A.V.** Gradient heat flux measurement in the vortex furnace of the upgraded boiler BKZ-210. *The problems of heat and mass transfer and hydrodynamics in power-plant engineering: Report s of VII school of young scientists and specialists of Academician V.E. Alesanov* (Kazan, 15–17 september 2010 г.).— Kazan: Publishing House of the Kazan university, 2010. P. 277–280. (rus.).

9. **Mityakov V.Yu., Osmanov V.V.** Gradient heat flux measurement in the radiative and complex heat transfer. *The problems of gas dynamics and heat and mass transfer in new energy technologies: s of XVIII Workshop for young*

scientists and specialists under the leadership of A. Leontiev, Zvenigorod, 23–27 may 2011. (rus.).

10. **Utility patent Russia 96654.** Heat flux sensor / V.Yu. Mityakov, S.Z. Sapozhnikov, A.V. Mityakov, K.A. Grigoryev, Yu.A. Roundyguine, V.E. Skuditskiy, V.V. Osmanov.— № 2010115436/28; Stated 19.04.2010; *Published 10.08.2010, Bulletin № 22.* (rus.).

11. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Grigoryev K.A., Roundyguine Yu.A., Osmanov V.V.** Development of the gradient heat flux sensors for the heat flux measurement in the combustion chambers. *Burning solid fuels: Proc. Reports. VIII All-Russia. Conf. with Intern. participation, Novosibirsk, 13–16 November 2012 (CD).* (rus.)

12. Thermal design of boilers (Normative method). Ed. 3rd.— St. Petersburg.: Publishing House of the NPO TsKTI, 1998. 256 p. (rus.)

13. **Osmanov V.V., Glushkov D.O., Brickman I.A., Chernetsky M.Yu.** Economic evaluation of the introduction of the gradient heat flux sensors for the heat flux measurement in the combustion chamber. *Russian Journal of scientific publications.* 2013. № 5(15). P. 43–45. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИГОРЬЕВ Константин Анатольевич — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой реакторных и котельных установок института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kg1210@mail.ru

РУНДЫГИН Юрий Александрович — доктор технических наук профессор кафедры реакторных и котельных установок института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: rundygin@yandex.ru

МИТЯКОВ Владимир Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: mitvlad@mail.ru

ОСМАНОВ Виктор Викторович — ассистент кафедры реакторных и котельных установок института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: osmanov_victor@mail.ru

AUTHORS

GRIGORYEV Konstantin A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kg1210@mail.ru

ROUNDYGUINE Yuriy A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: rundygin@yandex.ru

MITYAKOV Vladimir Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: mitvlad@mail.ru

OSMANOV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: osmanov_victor@mail.ru