

Измерение локальной плотности теплового потока методом градиентной теплометрии в топке котла ДКВр - 10/13

А. В. Бикмулин¹, В. М. Проскурин²,
А. В. Павлов³, П. Г. Бобылев⁴, Н. Е. Кикоть⁵

*Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого*

¹ bikandrey@mail.ru, ² slavaspbgpu@mail.ru,
³ pavlovav196@mail.ru, ⁴ pavel_b.g.97@mail.ru,
⁵ nikita224ees@gmail.com

Ю. В. Андреев

*Комитет по топливно-энергетическому комплексу
Ленинградской области*
yuv_andreev@lenreg.ru

Аннотация. В работе измерена локальная плотности теплового потока в топочном пространстве котлоагрегата ДКВр 10/13 методом градиентной теплометрии. Этот метод основа на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока. На экранные поверхности топочного пространства устанавливались датчики, что позволило напрямую измерить плотность теплового потока от пламени к экранным трубам. Этот способ установки первичных преобразователей для контроля и диагностики работы котлоагрегатов трудоемок и требует полного останова и расхолаживания котла. Охлаждаемый зонд типа «труба в трубе» с установленным на торце градиентным гетерогенным датчиком теплового потока позволил провести аналогичные измерения. Поскольку применение зонда не вносит непосредственных изменений в работу котла и не требует его останова, данный способ является хорошей альтернативой достаточно сложному и трудоемкому процессу установки датчиков в топочном пространстве. Результатом стали временные теплограммы, позволившая сравнить два способа измерений и сделать вывод о некорректной работе горелочного аппарата данного энергообъекта.

Ключевые слова: градиентная теплометрия; локальная плотность теплового потока; гетерогенный градиентный датчик теплового потока; котельный агрегат; охлаждаемый зонд

I. ВВЕДЕНИЕ

Измерение локальной плотности теплового потока (ПТП) в топке котельного агрегата является одной из приоритетных целей теплоэнергетики. При проектировании топочного пространства котельного агрегата расчет тепловоспринимающих поверхностей ведется исходя из равномерности тепловыделения, однако теплонапряженность экранной поверхности зависит от режима работы горелочного аппарата. На практике горелочное оборудование подбирается по экологическим нормам, не обращая внимание на равномерность тепловыделения. Неравномерный прогрев экранных поверхностей приводит к снижению ресурса оборудования [1].

В настоящее время большую часть энергосистемы, а именно 66% занимают тепловые электростанции (ТЭС) [2]. На ТЭС реализуются циклы газотурбинной установки (ГТУ), парогазовой установки (ПГУ) и паросиловой установки (ПСУ). Подавляющее большинство ТЭС используют цикл ПСУ. При

реализации такого цикла в качестве источника теплоты используют энергетические котлы.

Мониторинг рабочих процессов в котельных агрегатах необходим, так как местная ПТП может меняться на порядок и более, как с изменением теплового режима, так и ввиду неравномерности нагрева различных зон топочной поверхности [3]. Эта величина в значительной мере характеризует процессы теплообмена и гидродинамики в топке, влияет на температурный режим труб и, в конечном счете на эффективность, надежность и безопасность в целом. Процессы теплообмена в котельных установках контролируются параметрами пара на выходе из котла. Ввиду высокой инерционности установки контролировать, перегрев экранных поверхностей и неравномерность теплообмена таким образом невозможно.

Мониторинг рабочих процессов в котельных агрегатах включает в себя широкий спектр различных методов: калориметрию, термометрию, резистометрию, оптикометрию, метод вспомогательной стенки, электротепловую аналогию и др. В топочной технике важное значение имеет измерение воспринятых тепловых потоков, для чего применяются калориметрические методы (стационарные калориметры), термометрия (переносные термозонды, температурные вставки) и метод вспомогательной стенки (датчик теплового потока). Эти методы определения тепловых потоков основаны на термометрии с использованием эмпирических коэффициентов и различных поправок. Применение стационарных средств измерения воспринятых тепловых потоков осложнено трудоемкими монтажными операциями и вынужденным внедрением в контур циркуляции котла. Переносные зонды отличаются громоздкостью контрольно-измерительных средств и оборудования.

Градиентная теплометрия не имеет недостатков вышеперечисленных методов мониторинга. Установка высокотемпературных датчиков теплового потока позволит измерять локальную ПТП в любой части топки в режиме реального времени.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В системах управления энергетическими объектами, а также в теплотехническом эксперименте до 80% информации поступает от датчиков температуры. Тепловые потоки измеряют в десятки раз реже, что связано, в первую очередь, с отсутствием датчиков

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда целевого капитала СПбПУ

теплового потока (ДТП) приемлемого технического и ценового уровня.

А. Градиентная теплометрия

При измерении местной ПТП на поверхности используют ДТП типа вспомогательной стенки, по электрическому сигналу которого судят об измеряемой величине.

Исследования осуществлялись методом градиентной теплометрии. Метод основан на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) (рис.1). Градиентная теплометрия успешно применяется уже более четверти века как в промышленных, так и в лабораторных экспериментах [4, 5, 6].

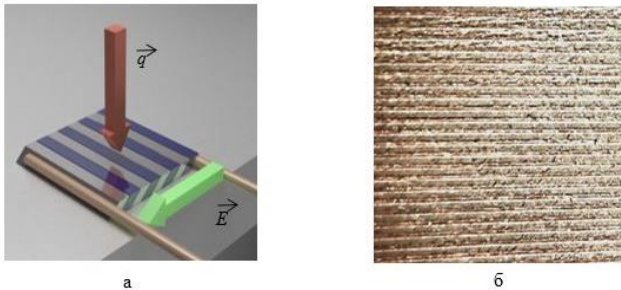


Рис. 1. Датчик теплового потока: а – модель датчика теплового потока, б – микроструктура датчика теплового потока

Принцип работы таких датчиков основан на поперечном эффекте Зеебека. При прохождении плотности теплового потока через датчик в нем возникает пропорциональная ему термо-ЭДС [7, 8].

$$E_0 = S_0 \cdot A \cdot q,$$

где E_0 – термоЭДС, мВ; S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт; A – площадь ГДТП в плане, м²; q – плотность теплового потока, Вт/м².

В. Постановка эксперимента

Эксперименты проводились на водогрейном котле ДКВр-10/13. В ранних работах по котельной теплометрии [9] рассмотрено использование датчиков теплового потока на экранных трубах с внедрением вставок в контур высокого давления. В экранные трубы вваривались специальные вставки (рис. 2). Вставками являлись заранее подготовленные участки экранных труб, с установленными на них датчиками теплового потока и термопарами. Постановка эксперимента таким способом возможна только при капитальном ремонте котлоагрегата, что является явным недостатком данного способа.

Этот способ трудоемок и оснастить любой котлоагрегат такой системой мониторинга невозможно. Автор [9] рассматривает еще один метод, а именно установка зонда в плавники экранных поверхностей. Этот метод не требует вмешательства в систему высокого давления, таким образом он имеет явное преимущество, но все равно требует механического воздействия на экранные поверхности и полного останова котлоагрегата.

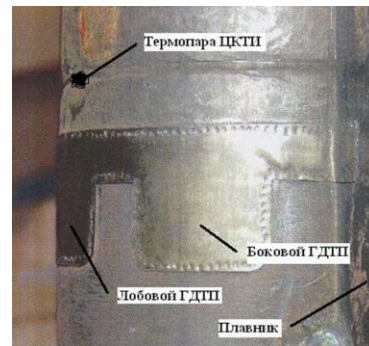


Рис. 2. Вставка с установленными на ней датчиками

Коллектив авторов [10] применяет для измерения плотности теплового потока на экранных поверхностях термометрию. В экранную поверхность монтируются две термопары на известном расстоянии друг от друга, по показаниям которых рассчитывается ПТП. Основным недостатком такого метода является трудоемкость и инерционность. Авторы [11] применили датчик теплового потока, созданный из 2-х термопар, что позволяет избежать внедрения в контур высокого давления, но инерционность прибора не позволит отслеживать пульсации плотности теплового потока и осуществлять быструю корректировку работы горелок.

В нашем эксперименте применялись ГДТП, установленные на поверхности экранных труб (рис. 3). При монтаже датчиков необходимо очистить экранную поверхность от механических загрязнений. Поверхность экранной трубы покрывается слоем термопасты, затем укладывается прослойка из слюды, после чего на слюду наносится термопаста и устанавливается датчик. Фиксация ГДТП на поверхности осуществляется при помощи нити из нихрома. Провода ГДТП выводятся через технологическое отверстие в обмуровке котла. Для прокладки проводов по топке применялись керамические чехлы. В качестве защитного материала для места контакта проводов и ГДТП применяется мертель высокоглиноземистый (компаунд). Особенностью данного компаунда является то, что при достижении температуры свыше 800 °С затвердевает и по своим физическим свойствам становится близок к керамике, что обеспечивает надежную фиксацию проводов.

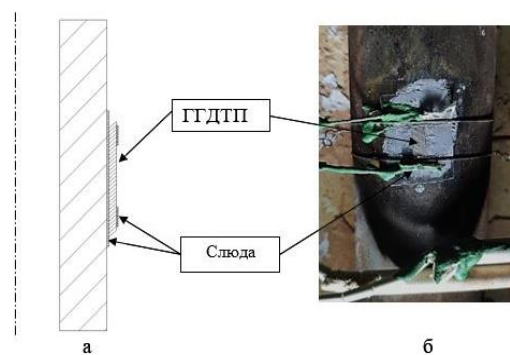


Рис. 3. ГДТП на экранной поверхности: а – схема установки ГДТП; б – фото ГДТП на экранной поверхности

Монтаж датчиков осуществлялся на высоте 1,1 м от дна топки, и на расстоянии 1,6 (ГДТП №1), 1,9 (ГДТП №2) и 2, 7 (ГДТП №3) м от фронта. Такое расположение датчиков позволит рассмотреть тепловыделение от конкретной горелки и выявить нарушения в ее работе. Применение градиентных датчиков теплового потока в таких агрессивных

условиях без защитных экранов не рассматривалось. Данный опыт в основном нацелен продемонстрировать применимость градиентной теплотметрии в котлоагрегатах. Схема расположения ГДТП в топке представлена на рис. 4.

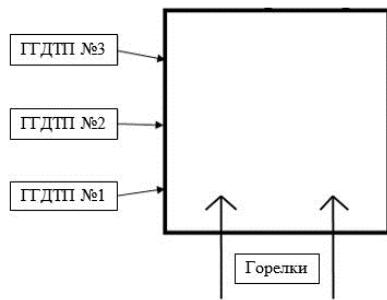


Рис. 4. Схема расположения ГДТП в топке котлоагрегата ДКВр - 10/13

С. Разработка охлаждаемого зонда

Как упоминалось ранее, используемые методы котельной теплотметрии имеют очевидный недостаток, поскольку во время установки измерительного оборудования в контур высокого давления вносятся изменения. Любые работы, связанные с установкой измерительной техники в топку котлоагрегата, требуют полного отключения системы, что влечет за собой экономические затраты. Наиболее подходящий способ измерения параметров горения в печи - использовать охлаждаемый зонд.

Изучив опыт зарубежных коллег [12], мы пришли к выводу о необходимости применения метода градиентной теплотметрии для измерения тепловых потоков с помощью аналогичного зонда. Для этого был разработан охлаждаемый зонд типа «труба в трубе» с установленным на конце ГДТП. Датчик теплового потока установлен на пятке из высокотеплопроводного материала (латуни). Для контроля температуры на поверхности пяты и внутри зонда были установлены две термопары (рис. 5).

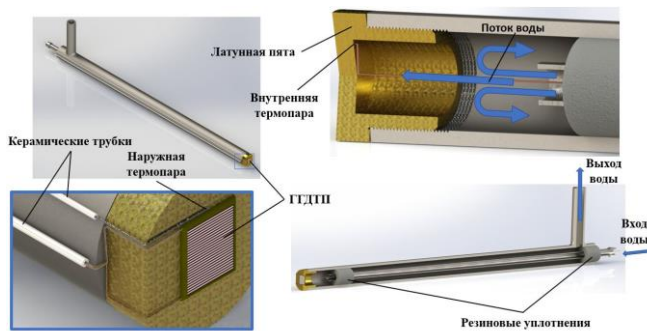


Рис. 5. Устройство охлаждаемого зонда

Промышленные испытания охлаждаемого зонда проводились на том же котле, на котором датчики теплового потока были установлены на поверхности стеновых труб. Этот эксперимент подтвердил эффективность данного способа измерения, что в будущем может значительно повысить качество контроля процессов в топке котлоагрегата.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В котле ДКВр-10/13 установлены две горелки на природном газе. В результате запуска котла и при выходе его на номинальный режим вышел из строя ГДТП №2. После останова котла и визуального осмотра механических повреждений не выявлено. Расположение ГДТП основывалось на визуальном наблюдении режима горения. ГДТП №1 устанавливался для фиксации плотности теплового потока от факела сразу после направляющего аппарата горелки. ГДТП №2 должен был фиксировать максимальное значение плотности теплового потока в момент наибольшего раскрытия факела. ГДТП №3 установлен вблизи задней стенки котла, для фиксации остаточных тепловыделений от продуктов горения.

Результаты градиентной теплотметрии котла ДКВр - 10/13 представлены на рисунке 6. Значения плотности теплового потока на боковой поверхности нагрева котла хорошо согласуются с данными полученными другими авторами при схожем позиционировании первичных преобразователей [9].

Данные о ПТП зафиксированные ГДТП демонстрируют нестабильный режим работы горелки.

Пulsации ПТП, зафиксированные ГДТП №1, незначительны, но все равно имеют ярко выраженную зависимость. При отдалении от направляющего аппарата горелки, пульсации пламени и его отклонение от оси горелки усиливаются, что характеризуют ярко выраженные пульсации, полученные ГДТП №3. Значения ПТП, полученные ГДТП №3 показывают, что наблюдается нестационарный тепловой режим. Вектор плотности теплового потока меняет направления, что характерно для сильного перегрева экранных поверхностей. Факел приближается и касается труб, тем самым их перегревая, а затем отдаляется, что выражается в виде отрицательных значений плотности теплового потока на графике (рис. 6).

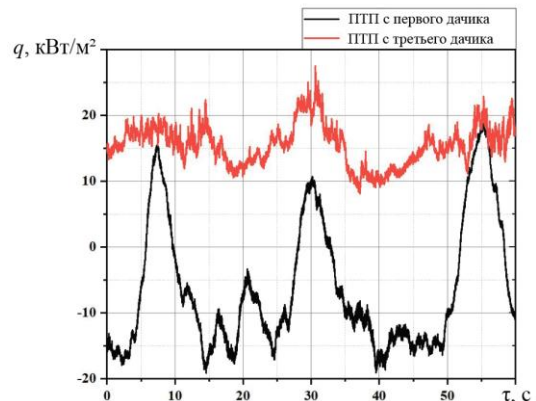


Рис. 6. Данные с ГДТП, установленных на экранной поверхности

Датчик №1 был установлен на экранной поверхности вблизи смотрового окна, для дальнейшей верификации измерительного зонда. В эксперименте с использованием зонда в качестве измерительного устройства на том же режиме работы котла зафиксированы значения ПТП схожие по величине с данными ГДТП №1 (рис. 7).

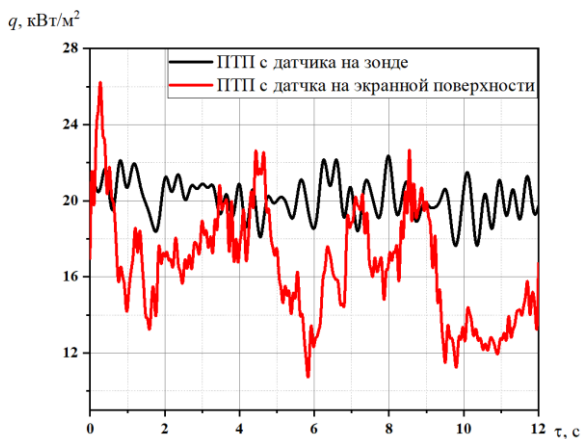


Рис. 7. Сравнение показаний ГДТП установленных на экранной поверхности и ГДТП на зонде

Результаты, полученные на зонде, показали, что необходимости монтировать ГДТ на экранные поверхности нет. И для контроля процессов в топке котла достаточно использовать переносной охлаждаемый зонд.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Градиентная теплотметрия, как метод, прошла успешные испытания в агрессивных условиях топочной камеры котельного агрегата.

Установка ГДТП на поверхность экранных труб сложный и энергозатратный процесс. Использование его в качестве системы мониторинга и наладки котельного агрегата применять не целесообразно. Надежнее и эффективнее создание охлаждаемого зонда [12] на основе ГДТП. Быстродействие датчиков позволит улавливать мельчайшие пульсации пламени и настроить горелочный аппарат максимально эффективно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Barykin S.Ye., Kapustina I.V., Sergeev S.M., and Yadykin V.K. Algorithmic Foundations of Economic and Mathematical Modeling of Network Logistics Processes. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 2020, Vol. 6, Page 189 6 (4): 189. <https://doi.org/10.3390/JOITMC6040189>.

[2] Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 году. Подготовлен в соответствии с «Правилами разработки и утверждения схем и программ перспективного развития электроэнергетики» (утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 17.10.2009 No 823) // Системный Оператор Единой Энергетической Системы -2020.

[3] Ahn T., Charnes A., Cooper W.W. Using Data Envelopment Analysis to Measure the Efficiency of Not-for-Profit Organizations: A Critical Evaluation—Comment. *Managerial and Decision Economics* 9 (3): 251–53, 1988.. <https://doi.org/10.1002/MDE.4090090310>.

[4] Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Babich A.Yu., and Zainullina E.R. The Study of Heat Flux Measurement for Heat Transfer during Condensation at Pipe Surfaces. *Technical Physics Letters* 2019 45:4 45 (4): 321–23. <https://doi.org/10.1134/S1063785019040163>.

[5] Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., A.V. Vintsarevich, Pavlov A.V., Nalyotov I.D. Gradient Heat Flux Measurement as Monitoring Method for the Diesel Engine. *Journal of Physics: Conference Series* 891 (1): 012096. 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012096>.

[6] Sapozhnikov S.Z., V.Yu. Mityakov, V.V. Seroshtanov, Gusakov A.A. The Combination of PIV and Heat Flux Measurement in Study of Flow and Heat Transfer near a Circular Finned Cylinder. *Journal of Physics: Conference Series* 1421 (1): 012064. 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1421/1/012064>.

[7] Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V. Heatmetry, Heat and Mass Transfer, , 2020. 209. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40854-1>.

[8] Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наукова думка, 1979. 385 с.

[9] Османов В.В. Совершенствование топочной теплотметрии на основе градиентных датчиков теплового потока: Автореф. дис ... канд. тех. Наук / СПбГПУ, 2015. 22 с.

[10] Taler, Jan, Dawid Taler, and Pawel Ludowski. 2014. "Measurements of Local Heat Flux to Membrane Water Walls of Combustion Chambers." *Fuel* 115 (January): 70–83. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.06.033>.

[11] Northover E.W., and Hitchcock J.A. 1967. "A Heat Flux Meter for Use in Boiler Furnaces." *Journal of Scientific Instruments* 44 (5): 371. <https://doi.org/10.1088/0950-7671/44/5/311>.

[12] Zhang Dalong, Hang Shi, Chenwei Meng, Yuxin Wu, Hai Zhang, Wu Zhou, and Shenming Ran. 2015. "Measurements on Heat Flux Distribution in a Supercritical Arch-Fired Boiler." *Clean Coal Technology and Sustainable Development - Proceedings of the 8th International Symposium on Coal Combustion, 2015*, no. 212029: 207–12. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2023-0_27.