

УДК 536.6

В.В. Османов

ГРАДИЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ДЛЯ ТЕПЛОМЕТРИИ В ТОПКАХ КОТЛОВ

V.V. Osmanov

GRADIENT HEAT FLUX GAUGES FOR MEASUREMENT IN INDUSTRIAL BOILER FURNACES

В статье описывается принцип действия, процесс создания, исследования и градуировки компактных высокотемпературных градиентных датчиков теплового потока для прямого измерения тепловосприятости ограждающими поверхностями камер сгорания промышленных котлов, приводятся их метрологические характеристики.

ДАТЧИК. ИЗМЕРЕНИЕ. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК. КАМЕРА СГОРАНИЯ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОТЕЛ.

The item describes action principle, development, research, graduation and metrological data of compact high temperature gradient heat flux gauges for direct heat flux density measuring in industrial boiler furnace walling.

THE GAUGE. MEASUREMENT. THERMAL STREAM. FURNACE. POWER BOILERS.

Основная проблема изучения теплообмена в камерах сгорания энергетических котлов — это получение первичной информации о тепловых потоках. Используемая сегодня топочная теплотометрия основана на термометрии с применением стационарных калориметров, переносных термозондов (ВНИИМТ, усовершенствованный ВТИ), температурных вставок (ЦКТИ) и др. [1]. Применение этих методов осложнено трудоемкими монтажными операциями, вынужденным внедрением в герметичный контур циркуляции котла и громоздкостью контрольно-измерительных средств и оборудования. Большинства недостатков указанных выше методов лишен метод стационарного прямого измерения воспринятого теплового потока с помощью компактных градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) [2, 3]. Значительное преимущество ГДТП — в прямом измерении интегрального воспринятого теплового потока. Датчик представляет собой искусственный многослойный композит, обладающий анизотропией тепло- и электропроводности. При возникновении градиента температуры на его противоположных гранях наблюдается поперечный эффект Зеебека: появляется термоЭДС при прохождении теплово-

го потока через сечение датчика. Разработка и исследования ГДТП на основе природных монокристаллов с рабочей температурой до 500 К ведутся с 1996 года С.З. Сапожниковым, В.Ю. Митяковым и А.В. Митяковым на кафедре теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) [4]. Этой же группой исследователей в 2007 году были созданы ГДТП на основе искусственных композитов из различных материалов. В частности, получены композитные системы из термостойких (до 1300 К) и коррозионностойких (например, никель + сталь 12Х18Н10Т) материалов [5, 6]. Это открыло новые возможности для применения ГДТП в условиях топок котлов и камер сгорания. Работы в этом направлении получили продолжение на кафедре реакторных и котельных установок СПбГПУ [7, 8]. Первый опыт применения ГДТП в топочной технике проведен в лабораторных условиях на жаротрубном водогрейном котле ВТГ-80. Тепловая мощность котла — 100 кВт, температура нагрева воды — 370 К, давление в водяном контуре — 0,4 МПа, топливо — соляровое масло. Эксперимент показал работоспособность ГДТП в топочных условиях. Успешное

промышленное освоение ГДТП осуществлено в 2008 году на паровом котле БКЗ-210 ст. № 9 ТЭЦ-4 г. Кирова [7, 9]. Тепловая мощность котла — 140 МВт, температура перегретого пара — 813 К, давление перегретого пара — 14 МПа, топливо — кузнецкий каменный уголь марок Г и Д, фрезерный торф, природный газ. Результаты испытаний показали возможность диагностики топочного режима, процессов шлакования и пульсаций тепловосприятя, но одновременно выявили необходимость совершенствования технологии изготовления ГДТП. Применяемый в лабораторном и промышленном эксперименте способ приварки отходящих от датчика электродов с помощью точечной сварки приводит к охрупчиванию зоны электрода вокруг места сварки и возможности его откалывания от датчика в процессе сборки либо термических нагрузок. Для устранения указанного недостатка предложена технология приварки электродов методом диффузионной сварки, которая обеспечивает большую по сравнению с точечной сваркой площадь контакта электрода с датчиком и высокую механическую прочность. Технология изготовления ГДТП новой конструкции заключается в двухэтапной диффузионной сварке биметаллических (никель + сталь 12Х18Н10Т) слоистых заготовок — анизотропных термоэлементов. На первом этапе спекается слоистая заготовка, на втором этапе к полученной заготовке диффузионной сваркой привариваются пластины, которые после нарезки будут служить электродами. Полученная заготовка с пластинами нарезается электроискровым методом на собственно датчики (рис. 1).

С целью исследования влияния температуры ГДТП на термоЭДС был создан градуировочный стенд с возможностью поддержания заданной температуры датчиков в широком диапазоне плотностей воспринятого теплового потока.

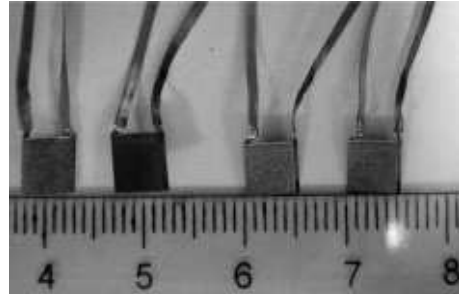


Рис. 1. Образцы ГДТП с электродами

В основу абсолютной (джоуль — лентевой) градуировки ГДТП заложено определение зависимости термоЭДС, генерируемой датчиком, от плотности теплового потока, проходящего сквозь датчик. Градуировочный стенд представляет собой трубку с установленными на ней двумя градуируемыми ГДТП и тремя термомпарами для контроля температуры стенки трубки (рис. 2). Коаксиально внутри трубки расположен нагреватель в виде электрической лампы накаливания, а снаружи — защитный кожух. В зазоре между трубкой и кожухом прокачивается холодный воздух с регулируемым расходом для поддержания заданной температуры ГДТП независимо от тепловыделения нагревателя. Толщины стенок трубки и ГДТП близки и составляют соответственно 0,1 и 0,5 мм. Термические сопротивления датчика ($9,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) и трубки ($6,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) отличаются незначительно, что обеспечивает практически одинаковую температуру датчика и трубки. За характерную температуру датчиков принимается средняя температура по трем термомпарам в стационарном режиме с погрешностью $\pm 5 \text{ К}$. Скорость охлаждающего воздушного потока в зазоре труб составляла 0,5–40 м/с. Принимая толщину кольцевого зазора за характерный размер, можно

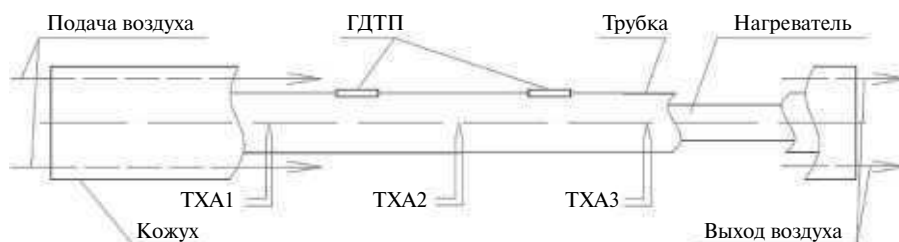


Рис. 2. Градуировочный стенд

получить, что эти скорости соответствуют $Re = 250-2 \cdot 10^4$. Это позволяет обеспечить переход от ламинарного к турбулентному режиму движения с высоким коэффициентом теплоотдачи. Рабочие условия градуировки были близки к внутрипочным: максимальная плотность теплового потока составляла 73 кВт/м^2 , температура трубки поддерживалась постоянной и равной 373, 473, 573 и 673 К. Мощность тепловыделения на нагревателе регулируется изменением напряжения. Плотность теплового потока на поверхности трубки, воспринятая датчиком, определялась как

$$q_d = \frac{P}{\pi dl} = \frac{UI}{\pi dl}, \quad (1)$$

где q_d — воспринятая датчиком плотность теплового потока, Вт/м^2 ; P — мощность тепловыделения на нагревателе, Вт; d и l — диаметр и длина трубки соответственно, м; U [В] и I [А] — измеренные значения напряжения и силы тока на клеммах нагревателя.

Анализ тепловых потерь проводился на основе термометрической съемки стенда с помощью тепловизора марки Testo 875-2i с погрешностью $\pm 2 \text{ К}$. Так, концевые потери вызваны керамическими клеммниками нагревателя, которые выступают за трубку с ГДТП на 12 мм с каждой стороны, а температура защитного кожуха за счет интенсивного охлаждения воздухом и небольшой толщины стенки (0,1 мм) оставалась постоянной при различной мощности нагревателя и практически не отличалась от температуры в помещении. За счет этого тепловыми потерями от наружного охлаждения кожуха можно пренебречь. Все тепловыделение нагревателя, за исключением концевых потерь, воспринимается трубкой с ГДТП и отводится охлаждающим воздухом, поэтому плотности те-

плового потока, проходящего сквозь трубку и сквозь датчики, одинаковы. Оценка концевых потерь проводилась по общепринятой методике [10] с учетом конвективной и лучистой составляющих тепловых потерь. Их величина не превышает 2 %.

Методика измерения воспринятого теплового потока с помощью ГДТП состоит в измерении термоЭДС при известной вольт-ваттной чувствительности и площади датчика:

$$q = \frac{E}{S_0 F_d}, \quad (2)$$

где q — измеряемая с помощью ГДТП воспринятая плотность теплового потока, Вт/м^2 ; E — измеренное значение термоЭДС, мкВ; S_0 — вольт-ваттная чувствительность, мкВ/Вт; F_d — площадь ГДТП в плане, м^2 .

Градуировка ГДТП состоит в определении вольт-ваттной чувствительности. Из одной заготовки отградуированы два датчика. Осуществлена трехкратная повторяемость опытов. Вольт-ваттная чувствительность определялась на основе выражения (2) следующим образом:

$$S_0 = \frac{E}{q_d F_d} = \frac{E \pi dl}{UI F_d}. \quad (3)$$

Усредненные по двум ГДТП результаты градуировки представлены на рис. 3.

Как показывают результаты градуировки, характер зависимости вольт-ваттной чувствительности от плотности воспринятого теплового потока практически линейный. Среднее значение вольт-ваттной чувствительности в диапазоне плотностей теплового потока $10-73 \text{ кВт/м}^2$ и температур 373–673 К составляет 124 мкВ/Вт . На рис. 3, она стремится к постоянному значению 122 мкВ/Вт , что составляет менее 2 % относительного отклонения от среднего значения.

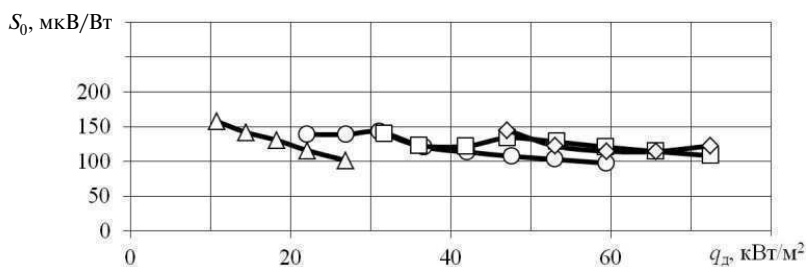


Рис. 3 Результаты градуировки при различных температурах ГДТП: \blacktriangle — 373 К; \bullet — 473 К; \blacksquare — 573 К; \blacklozenge — 673 К

Таким образом, при измерении плотности воспринятого теплового потока влиянием температуры ГДТП можно пренебречь. Данный результат демонстрирует важнейшую метрологическую характеристику ГДТП — стабильность вольт-ваттной чувствительности в широком диапазоне температур и плотностей теплового потока.

Анализ погрешности градуировки проведен в соответствии с [11] на основе суммарной стандартной неопределенности. Стандартная неопределенность измерения вольт-ваттной чувствительности составила $\Delta S_0 = 6$ мкВ/Вт и получена через значения термоЭДС, плотности воспринятого датчиком теплового потока и площади ГДТП при 673 К по формуле

$$\Delta S_0 = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (4)$$

где f — функция, определяемая выражением (3); x — аргумент в выражении (3). Относительная

погрешность определения вольт-ваттной чувствительности составила $\delta S_0 = 5,5$ %.

Разработаны и созданы ГДТП на основе слоистого анизотропного термостойкого композита Ni + сталь 12X18H10T для теплотрии в топках котлов. Усовершенствована технология приварки электродов к ГДТП с помощью диффузионной сварки, которая обеспечивает большую по сравнению с точечной сваркой площадь контакта электрода с датчиком и высокую механическую прочность. Разработана методика изотермической градуировки датчиков и создан градуировочный стенд. Результаты градуировки демонстрируют стабильную вольт-ваттную чувствительность на уровне 122 мкВ/Вт в широком диапазоне плотностей воспринятого теплового потока при различной температуре. Это позволяет разработать методику градиентной теплотрии в топках современных котлов с использованием ГДТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трембовля, В.И.** Теплотехнические испытания котельных установок [Текст] / В.И. Трембовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева.— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 416 с.;
2. **Сапожников, С.З.** Градиентные датчики в нестационарной теплотрии процессов [Текст] / С.З. Сапожников, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков // XIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов.— Москва, 2003.— Т. 1.— С. 127–130.
3. **Митяков, В.Ю.** Градиентная теплотрия в радиационном и сложном теплообмене [Текст] / В.Ю. Митяков, В.В. Османов // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях.— Тез. докл. XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева.— Звенигород, 23–27 мая 2011.
4. **Сапожников, С.З.** Изучение радиационно-конвективных тепловых потоков с помощью градиентных датчиков [Текст] / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников // Вторая Росс. национ. конф. по теплообмену: Тез. докл. науч. конф. 26–30 октября 1998 г.— М., 1998.— Т.6.— С. 331–334;
5. **Сапожников, С.З.** Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте [Текст] / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.— 203 с.
6. **Пат. 75467 РФ, МПК G 01 K 17/06.** Датчик теплового потока (варианты) [Текст] / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников.— № 2007137839; заявл. 04.10.2007; опубл. 10.08.2008.— Бюл. № 22.
7. **Sapozhnikov S.Z.** Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces [Text] / S.Z. Sapozhnikov, K.A. Grigoryev, V.Yu. Mitiakov, A.V. Mitiakov, Yu.A. Roundyguine, V.V. Osmanov // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.— Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.— P. 504–506.
8. **Сапожников, С.З.** Основы градиентной теплотрии [Текст] / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 203 с.
9. **Османов, В.В.** Градиентная теплотрия в вихревой топке модернизированного котла БКЗ-210 [Текст] / В.В. Османов, К.А. Григорьев, А.В. Митяков // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Матер. докл. VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова.— Казань, 15–17 сентября 2010 г.— Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010.— С. 277–280.
10. **Исаченко, В.П.** Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.— М.: Энергия, 1975.— 488 с.
11. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 43–2001.

REFERENCES

1. **Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeev A.A.** Thermal testing of boilers [Tekst].— M.: Energoatomizdat, 1991. (rus.)
2. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov A.V., Mitiakov V.Yu.** Gradient gauges in time-dependent heat flux measurement [Tekst] / XIII School-Seminar of Young Scientists and Specialists.— Moscow, 2003.— Vol. 1.— P. 127–130 (rus.)
3. **Mitiakov V.Yu., Osmanov V.V.** Gradient heat flux measurement in the radiative and complex heat transfer [Tekst] // The problems of gas dynamics and heat and mass transfer in new energy technologies: Abstracts of XVIII Workshop for young scientists and specialists under the leadership of A. Leontiev.— Zvenigorod, 23–27 may 2011. (rus.)
4. **Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V., Sapozhnikov S.Z.** Researching of radiation-convective heat flow using gradient sensors [Tekst] // The Second Russian National conference of heat exchange: Abstracts of science conference 26–30 october 1998 г.— Moscow, 1998.— Vol. 6.— P. 331–334. (rus.)
5. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Gradient heat flux gauges in the heat engineering experiment [Tekst].— Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2007.— 203 p. (rus.)
6. **Pat. 75467 Russia, MPK G 01 K 17/06.** Heat flux sensor (variants) [Tekst] / V.Yu. Mitiakov, A.V. Mitiakov, S.Z. Sapozhnikov.— № 2007137839; appl. 04.10.2007; publ. 10.08.2008.— Bull. № 22. (rus.)
7. **Sapozhnikov S.Z., Grigoryev K.A., Mitiakov, V.Yu. [et all.].** Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces [Text] // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.— Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.— P. 504–506.
8. **Sapozhnikov S.Z. Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Basics of the gradient heat flux measurement [Tekst]. — Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2012.— 203 p. (rus.)
9. **Osmanov V.V., Grigoryev K.A., Mitiakov A.V.** Gradient heat flux measurement in the vortex furnace of the upgraded boiler BKZ-210 [Tekst] // The problems of heat and mass transfer and hydrodynamics in power-plant engineering: Report Abstracts of VII school of young scientists and specialists of academician V.E. Alemasov.— Kazan, 15–17 september 2010 г.— Kazan: Publishing House of the Kazan university, 2010.— P. 277–280. (rus.)
10. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.** Heat transfer [Tekst].— M.: Energiya, 1975.— 488 p. (rus.)
11. Recommendations on interstate standardization RMG 43–2001 [Tekst]. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

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