

УДК 536.6

РАЗРАБОТКА ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ДЛЯ ТЕПЛОМЕТРИИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

*Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.,
Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Османов В.В.*

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург*

Теплометрия в высокотемпературных условиях камер сгорания является сложной, трудоемкой и дорогостоящей областью исследований. Она важна при наладке энергетического оборудования и исследовании процессов (теплообменных, шлакования и др.), влияющих на плотность воспринятого теплового потока. Такие исследования энергетического оборудования необходимы для освоения и создания новых технологий и оборудования. Знание локальных значений тепловосприятия топочных экранов в камерах сгорания энергетических котлов необходимо при разработке новых высокоэффективных технологий сжигания твердого топлива, разработке методов диагностики горения топлива и шлакования, определении неравномерности внутритопочного тепловыделения по ширине, глубине и высоте топки. Разработка недорогих и надежных средств измерения воспринятой плотности теплового потока является чрезвычайно важной и актуальной задачей современной топочной теплометрии.

В настоящее время существуют различные способы измерения воспринятого теплового потока: переносные термозонды, температурные вставки, калориметры и др. Большинство из них основано на измерении температуры, а тепловые потоки определяются расчетом с использованием эмпирических коэффициентов и различных поправок. Применение этих методов осложнено трудоемкими монтажными операциями, вынужденным внедрением в контур циркуляции котла и громоздкостью контрольно-измерительных средств и оборудования. Результаты, полученные с помощью данных методов, являются опосредованными. Наибольший интерес вызывает метод прямого измерения воспринятого теплового потока с помощью датчиков 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 теплового потока через сечение датчика [1]. Работы по разработке и исследованию градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) на основе природных монокристаллов с рабочей температурой до 500 К ведутся с 1996 г. С.З. Сапожниковым, В.Ю. Митяковым и А.В. Митяковым на кафедре "Теоретические основы теплотехники" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [2]. Этой же группой исследователей в 2007 г. были созданы ГДТП на основе композитов из различных материалов. В частности, получены композитные системы из термостойких (до 1300 К) и коррозионностойких материалов (например, никель+сталь 12Х18Н10Т), обладающие приемлемой чувствительностью применительно к топочной технике [3]. Установле-

на аномальная постоянная времени датчиков (около 10 нс), что позволяет выполнять практически безынерционное измерение тепловых потоков в различном энергетическом оборудовании. Это открыло новые возможности для применения ГДТП в условиях топок котлов и камер сгорания. Работы в этом направлении



Рис. 1. Заготовка для ГДТП

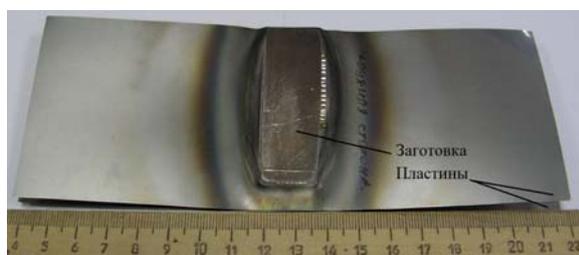


Рис. 2. Заготовка с приваренными пластинами



Рис. 3. Заготовка и ГДТП с электродами

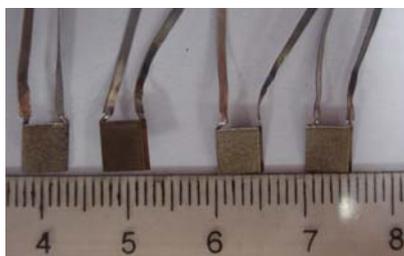


Рис. 4. Опытная партия ГДТП с электродами (рис. 3 и 4).

2. Разработана и апробирована методика градуировки ГДТП на специально созданном лабораторном стенде, отличительной особенностью которого являются рабочие условия, близкие к внутритопочным, при постоянной темпе-

проводятся совместно кафедрами "Теоретические основы теплотехники" и "Реакторо- и парогенераторостроение" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Первый опыт применения ГДТП на котле БКЗ-210 ТЭЦ-4 г.Кирова в 2007 г. показал принципиальную возможность создания и применения таких датчиков в условиях топочной теплотеметрии, но одновременно выявил необходимость совершенствования конструкции и методики измерений. С этой целью требуется отработать конструкцию датчика, обеспечивающую наибольшую точность измерения воспринятого теплового потока, обладающую высокой надежностью, простотой монтажа в условиях современных топок котлов, возможностью быстрой замены без останова котла, а также миниатюрными габаритами для уменьшения искажений теплового состояния экрана. Работы в этом направлении выполнялись в несколько этапов.

1. **Усовершенствование технологии изготовления** заготовок для ГДТП заключается в двухэтапной диффузионной сварке биметаллических (никель+сталь 12X18Н10Т) слоистых заготовок. На первом этапе спекается слоистая заготовка (рис. 1). На втором этапе к полученной заготовке привариваются пластины, которые после нарезки будут служить электродами (рис. 2). Полученная заготовка с пластинами нарезается на пластинки толщиной 0,5 мм и размерами в плане 5x5,5 мм

ратуре датчиков. В основу абсолютной (джоуль-ленцевой) градуировки ГДТП заложено установление зависимости термоЭДС, генерируемой датчиком, от плотности теплового потока, проходящего сквозь датчик. Градуировочный стенд представляет собой трубку, с установленными на ней градуируемыми ГДТП и тремя термопарами для контроля температуры стенки трубки и самих ГДТП (рис. 5). Коаксиально внутри трубки расположен нагреватель в виде электрической лампы накаливания. С целью исследования влияния температуры ГДТП на генерируемую термоЭДС градуировочный стенд помещен в защитную трубку. В зазоре между трубкой и защитной трубкой прокачивается холодный воздух с регулируемым расходом для поддержания постоянной температуры ГДТП. Мощность тепловыделения на нагревателе регулируется изменением напряжения. Плотность теплового потока на поверхности трубки (воспринятая датчиком) Вт/м²

$$q_{тр-изл} = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{U \cdot I}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (1)$$

где U , В и I , А – измеренные значения напряжение и силы тока на клеммах нагревателя; $d = 0,017$ м и $l = 0,23$ м – диаметр и длина трубки соответственно. Максимальная плотность теплового потока на трубке достигает 120 кВт/м², что

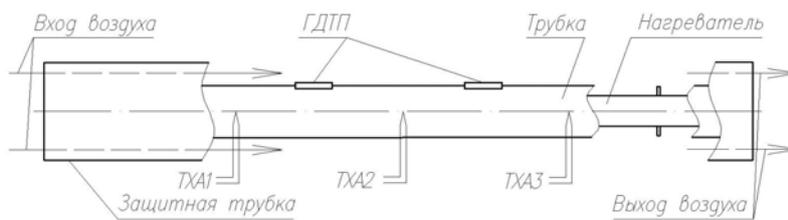


Рис. 5. Градуировка ГДТП

соответствует величине падающей плотности теплового потока на стенке топочной камеры при факельном сжигании. Измерение термоЭДС ГДТП и термопар производится с помощью 24-разрядного аналого-

цифрового преобразователя в программной среде ZETLab [4].

При градуировке ГДТП определяется важнейшая характеристика – вольт-ваттная чувствительность датчика мкВ/Вт

$$S_0 = \frac{E}{q_{тр-изл} \cdot F} = \frac{E \cdot \pi \cdot d \cdot l}{U \cdot I \cdot F} \quad (2)$$

где E – измеренное значение термоЭДС, мкВ; F – площадь ГДТП в плане, м², откуда определяемая с помощью датчика плотность теплового потока, Вт/м²

$$q = \frac{E}{S_0 \cdot F} \quad (3)$$

Анализ результатов градуировки (рис. 6) показывает, что характер зависимости термоЭДС от воспринятой плотности теплового потока при различной температуре датчика нелинейный с одним максимумом в зоне низких тепловых потоков до 50 кВт/м².

Установлено, что температура датчиков в зоне низких тепловых потоков в значительной степени влияет на генерируемую термоЭДС. При этом наблюдается эффект смещения максимумов термоЭДС при увеличении температуры датчиков. Данное явление подчиняется закону смещения Вина. Анализ результатов лабораторных исследований показывает, что вольт-ваттная чувствительность стремится к постоянному значению 100 мкВ/Вт (см. рис. 7) в диапазоне плотно-

стей теплового потока, близких к внутритопочным (а именно, более 50 кВт/м^2) при различной температуре ГДТП, соответствующей температуре стенки экранов топки ($300 - 770 \text{ К}$). Данный эффект обеспечивает важнейшую метрологическую характеристику – стабильность показаний ГДТП в условиях теплового состояния экранов топки.

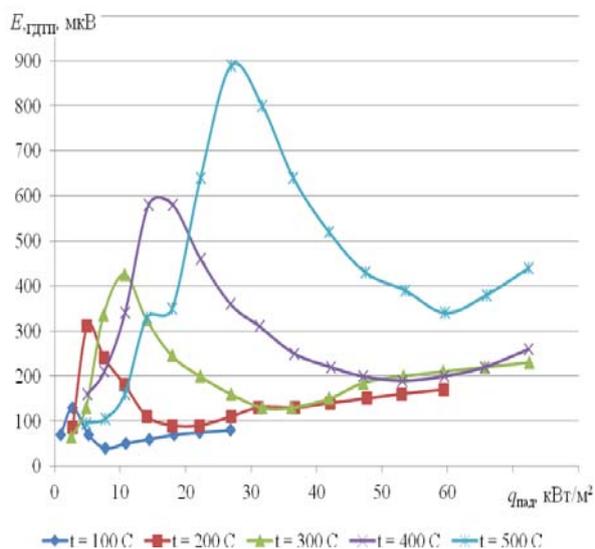


Рис. 6. Зависимость термоЭДС ГДТП от плотности воспринятого теплового потока

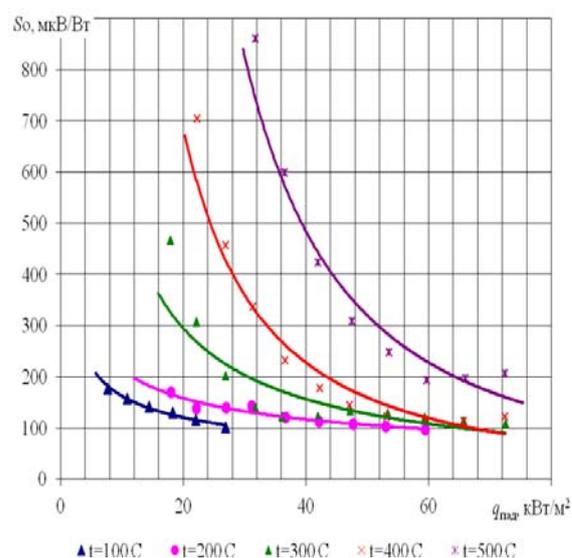


Рис. 7. Результаты градуировки ГДТП

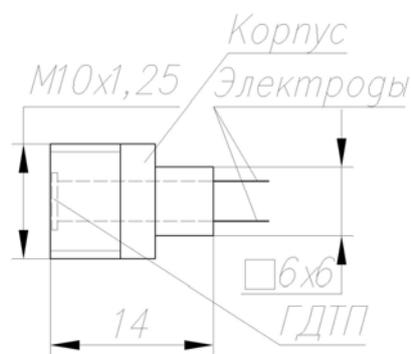


Рис. 8. Внешний вид универсальной измерительной ячейки

3. Разработан способ установки и создан корпус универсальной измерительной ячейки (ИЯ), в котором размещается ГДТП с электродами (рис. 8) [5]. Габариты и размеры измерительной ячейки выбирались исходя из конструкции газоплотного экрана топки котла П-49, работающего в блоке 500 МВт на Назаровской ГРЭС. Теплоотвод от корпуса ИЯ осуществляется через резьбовое соединение. Измерительная ячейка устанавливается на плавнике газоплотного топочно-экрана с внешней стороны топки. Электроды выводятся сквозь обмуровку через защитную трубку, приваренную к плавнику в месте установки измерительной ячейки (рис. 9).

Опыт сжигания шлакующих углей (например, канско-ачинского бассейна) показал, что в ходе эксплуатации межтрубное пространство газоплотных топочных экранов покрывается слоем пористых отложений, препятствующий тепловосприятию межтрубного плавника. В связи с этим предложено вынести торцевую тепловоспринимающую поверхность измерительной ячейки в плоскость внутренней образующей топочных экранов с установкой измерительной ячейки на сухаре (рис. 10).

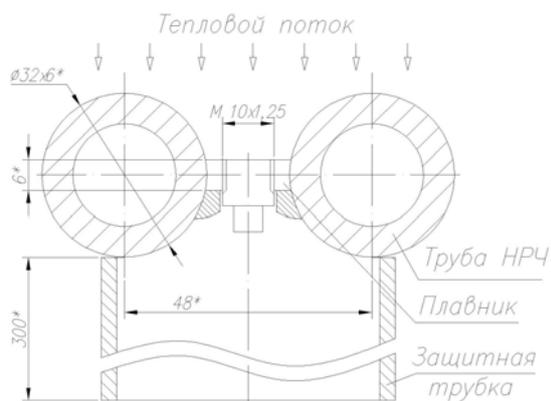


Рис. 9. Установка измерительной ячейки на плавнике газоплотного топочного экрана

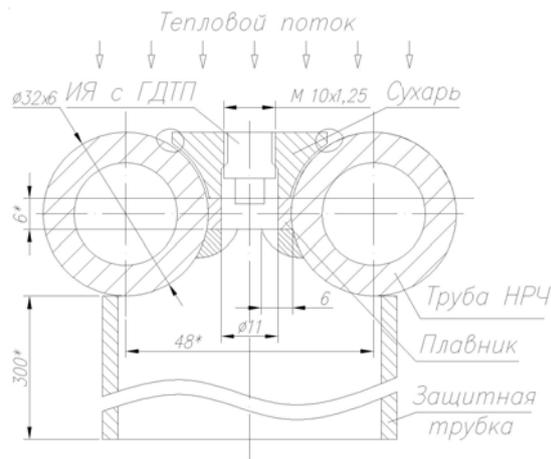


Рис. 10. Установка измерительной ячейки на сухаре газоплотного топочного экрана

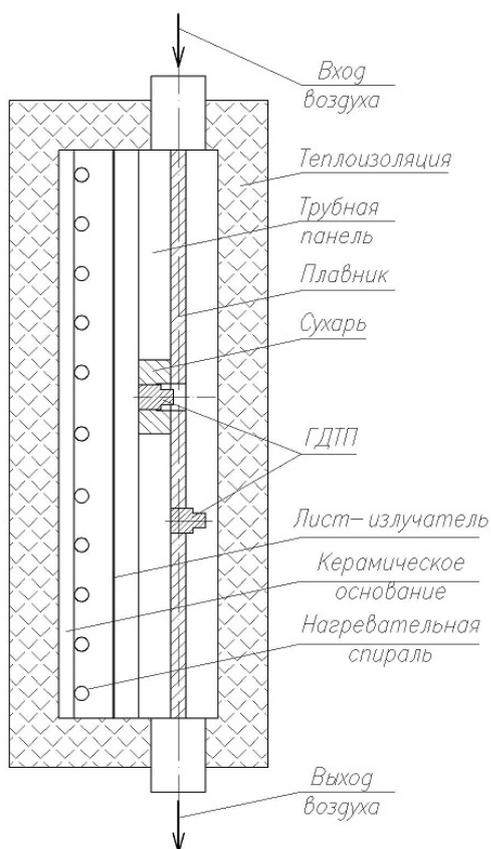


Рис. 11. Градуировка измерительных ячеек

проводилась на специально созданной физической модели, моделирующей рабочее тепловое состояние газоплотного топочного экрана прямооточного котла П-49 сверхкритического давления (рис. 11). Проверялись метрологические характеристики измерительных ячеек, проводилась их градуировка, учитывающая конструктивные особенности изготовления и способ установки каждой измерительной ячейки. Фрагмент газоплотного топочного экрана изготовлен по рабочим чертежам завода-изготовителя и представляет собой четыре трубы $\text{Ø}32 \times 6$ длиной 230 мм из стали 12X1МФ, сваренные между собой с шагом 48 мм металлическими полосами, толщиной 6 мм. С огневой стороны экрана сварен сухарь с внутренней резьбой и установленной в него измерительной ячейкой. В одном поясе с сухарем на соседних плавниках установлены ещё 2 измерительные ячейки. На лобовой и боковой образующей трубы, а также на плавнике установлены три контрольных ГДТП без корпусов (рис. 12). Перед панелью расположен лист-излучатель, температура которого измеряется пятью термопарами, закрепленными со стороны панели. Нагревается лист-излучатель нихромовой спиралью на керамическом основании. Мощность тепловыделения регулируется напряжением на спирали. Теплоотвод осуществляется прокачкой холодного воздуха внутри труб. Со всех сторон стенд теплоизолирован, на основе чего принято допущение отсутствия тепловых потерь через наружное ограждение. Поэтому количество теплоты, выделившееся на нагревателе, полностью воспринимается топочным экраном. Плотность падающего

теплового потока от листа-излучателя $q_{пад}$, Вт/м² определялась по уравнению Стефана-Больцмана

$$q_{пад} = a \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (4)$$

где $a = 0,6$ – степень черноты листа-излучателя из нержавеющей стали;
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴); T – средняя измеренная температура листа-излучателя, К. В качестве опорных значений воспринятой плотности теплового потока принимаются показания контрольных ГДТП. Средняя плотность теплового потока по всей площади трубной панели, Вт/м²

$$\bar{q}_{ГДТП} = \frac{q_{ГДТП\ пл} + q_{ГДТП\ бок} + q_{ГДТП\ лоб}}{3}, \quad (5)$$

где $q_{ГДТП\ пл}$, $q_{ГДТП\ бок}$ и $q_{ГДТП\ лоб}$, – определенные по выражению (3) воспринятые плотности теплового потока ГДТП на плавнике, боковой и лобовой поверхностях соответственно, Вт/м².

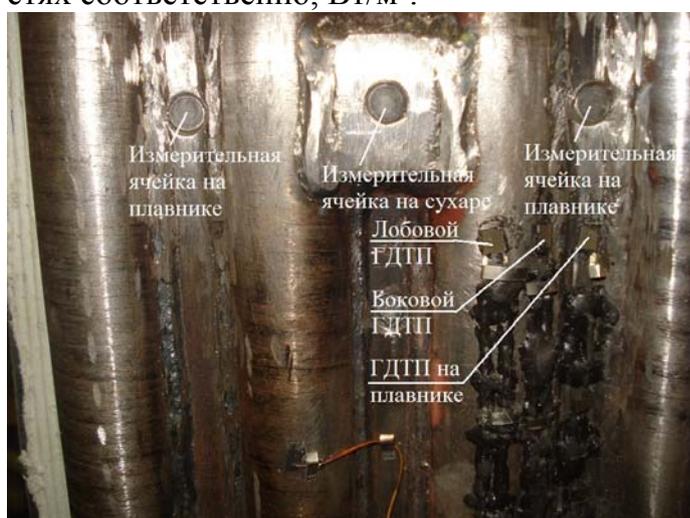


Рис. 12. Установка контрольных ГДТП и измерительных ячеек на физической модели

Зависимость плотности воспринятого теплового потока по показаниям контрольных ГДТП от плотности падающего теплового потока, рассчитанного по формуле (4), представлена на рис. 13. Наблюдается ярко выраженная неравномерность тепловосприятия за счет кривизны трубной поверхности. Так, лобовой ГДТП (лобовая поверхность трубы) воспринимает наибольшее количество теплоты, боковой ГДТП (боковая поверхность трубы) – среднее, а ГДТП на плавнике (собственно

плавник) – наименьшее количество теплоты. На основе этих данных представляется возможным определение доли воспринятой теплоты трубой $k_{тр}$ и плавником $k_{пл}$ от среднего тепловосприятия трубной панелью

$$k_{тр} = \frac{q_{ГДТП\ лоб} \cdot F_{лоб} + q_{ГДТП\ бок} \cdot F_{бок}}{q_{ГДТП\ пл} \cdot F_{пл} + q_{ГДТП\ бок} \cdot F_{бок} + q_{ГДТП\ лоб} \cdot F_{лоб}}, \quad (6)$$

$$k_{пл} = \frac{q_{ГДТП\ пл} \cdot F_{пл}}{q_{ГДТП\ пл} \cdot F_{пл} + q_{ГДТП\ бок} \cdot F_{бок} + q_{ГДТП\ лоб} \cdot F_{лоб}}. \quad (7)$$

где $F_{пл}$, $F_{бок}$, $F_{лоб}$ – площадь плавников, боковых и лобовых поверхностей газоплотной топочной панели, м². В результате натурных исследований были установлены следующие значения долей тепловосприятия: $k_{тр} = 0,81$ и $k_{пл} = 0,19$.

В свою очередь, характер зависимости среднего тепловосприятия, определенного по формуле (5) и локальных тепловосприятий измерительными ячейками, полученных по формуле (3) от плотности падающего теплового потока можно проследить на рис. 14. Очевидно, что воспринятая плотность теплового потока измерительной ячейкой на сухаре выше, а измерительной ячейкой на плавнике ниже среднего тепловосприятия. Именно поэтому градуировка изме-

рительных ячеек сводится к определению индивидуального коэффициента для каждой измерительной ячейки. Этот коэффициент определяется следующим образом:

– для измерительных ячеек на плавнике

$$a_{пл i} = \frac{q_{ИЯ пл i}}{q_{ГДТП}}; \quad (8)$$

– для измерительных ячеек на сухаре

$$a_{сух j} = \frac{q_{ИЯ сух j}}{q_{ГДТП}}, \quad (9)$$

где $q_{ИЯ пл i}$ и $q_{ИЯ сух j}$ – определенные по выражению (3) воспринятые плотности теплового потока i -ой и j -ой измерительными ячейками на плавнике и сухаре соответственно.

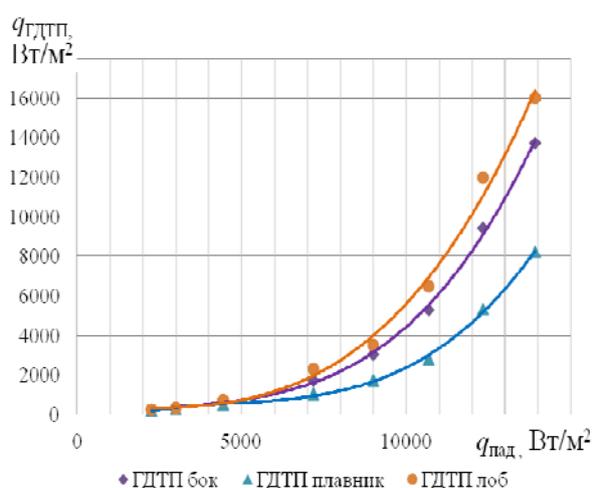


Рис. 13. Результаты измерений воспринятого теплового потока с помощью ГДТП без корпусов

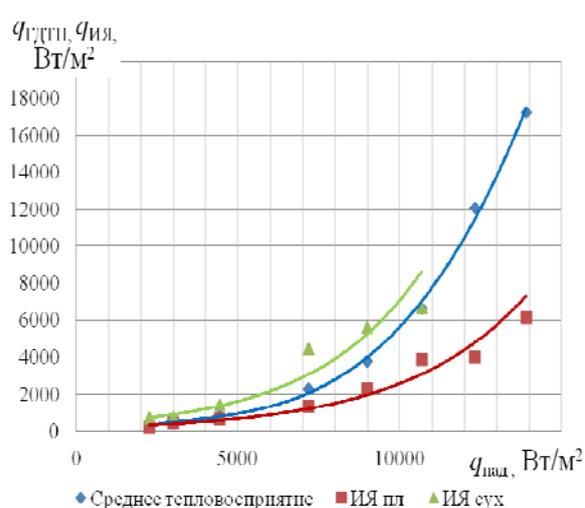


Рис. 14. Сравнение результатов измерений воспринятого теплового потока с помощью измерительных ячеек и среднего тепловосприятия ГДТП без корпусов

В промышленных условиях представляется возможным определение локального тепловосприятия экранной поверхностью на основе сигналов измерительных ячеек. В зависимости от способа установки измерительных ячеек (на плавнике или на сухаре) с учетом известных коэффициентов $a_{пл}$ и $a_{сух}$ из выражений (8) и (9) можно определить среднюю воспринятую плотность теплового потока топчным экраном

– при установке измерительной ячейки на плавнике

$$\bar{q}_{экр} = \frac{q_{ИЯ пл i}}{a_{пл i}} \quad (10)$$

– при установке измерительной ячейки на сухаре

$$\bar{q}_{экр} = \frac{q_{ИЯ сух j}}{a_{сух j}} \quad (11)$$

Значения измеренного локального тепловосприятия экранной поверхностью позволяют определить локальные коэффициенты тепловой эффективности теплообменной поверхности, последние, в свою очередь, позволяют рассчитать

средний по топке коэффициент тепловой эффективности как один из замыкающих параметров теплового расчета камер сгорания

$$\psi_{cp} = \frac{\sum \psi_{лок} \cdot F_{cm}}{F_{cm}} \quad (12)$$

В результате проведенных исследований разработаны, созданы и запатентованы измерительные ячейки на основе ГДТП, доказавшие свою работоспособность. Отличительной особенностью измерительных ячеек является их компактность, легкий способ установки на плавнике газоплотного топочного экрана, не требующий внедрения в пароводяной тракт котла, сооружения строительных лесов, привлечения сварочных работ, останова и расхолаживания котла в случае необходимости замены измерительной ячейки. Разработана методика градуировки и созданы лабораторные стенды, которые обеспечивают рабочие условия, близкие к внутритопочным при сжигании органических топлив. Отградуированные ГДТП и измерительные ячейки на их основе могут быть использованы для системы диагностики работы камер сгорания:

- количественно измерить локальную воспринятую топочными экранами плотность теплового потока;
- рассчитать местный и средний по топке коэффициенты тепловой эффективности на основе локальных значений тепловосприятия;
- диагностировать зоны шлакования по величине воспринятого теплового потока;
- оценить неравномерность тепловосприятия топочными экранами по ширине, глубине и высоте топки, что позволяет разработать методы режимного выравнивания;
- оценить положение факела в топочном объеме;
- разработать рекомендации по уточнению методики теплового расчета топок с многократной циркуляцией крупнодисперсной фазы с помощью корректировки коэффициента тепловой эффективности, рассчитанного на основе прямых измерений плотности локального воспринятого теплового потока.

Литература

1. Сапожников, С.З. Градиентные датчики в нестационарной теплотехнике процессов / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников // XIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов. – Москва, 2003. – Т.1. – С. 127-130.
2. Сапожников, С.З. Изучение радиационно-конвективных тепловых потоков с помощью градиентных датчиков / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников // Вторая Российская Национальная конференция. по теплообмену. – 1998. – Т.6. – С. 331-334.
3. Сапожников, С.З. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 203 с.
4. <http://www.zetms.ru/>
5. Пат. на пол. модель 96654 России. 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