

УДК 654.949

СЕЛЕКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В МНОГОГОРЕЛОЧНЫХ ЭНЕРГОБЛОКАХ

**С.М. БОРЗОВ¹, В.В. ГАРКУША², В.И. КОЗИК¹, В.П. МИХЕЕВ³,
О.И. ПОТАТУРКИН¹, Н.Н. ШУШКОВ¹**

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

²*Конструкторско-технологический институт вычислительной
техники СО РАН, Новосибирск*

³*Государственное унитарное предприятие “Управление энергетики и
водоснабжения СО РАН”, Новосибирск*

В реальных (промышленных) условиях проведены исследования процессов горения газообразных углеводородов в многогорелочных котлоагрегатах, установлены закономерности изменения параметров излучения отдельных факелов в основных режимах. Создан комплекс дистанционной диагностики, позволяющий в условиях многофакельного горения осуществлять селективный контроль отдельных горелочных устройств и обеспечивающий предоставление оператору информации об относительной интенсивности свечения факелов и о концентрации кислорода и водорода в уходящих газах, для осуществления процедур оптимизации сжигания газового топлива. Комплекс использован при разработке автоматизированной системы управления технологическими процессами тепловой станции.

В настоящее время котельное оборудование большинства предприятий в России в значительной степени устарело и требует модернизации. По данным литературных источников только Белгородский котельный завод с 1953 г. выпустил около 10 тысяч котлов средней мощности и котлов-утилизаторов. Значительная часть этого оборудования по сегодняшний день находится в эксплуатации, и, несомненно, давно морально и физически устарела. Экологические показатели этих котлов соответствуют требованиям 50-х – 80-х годов прошлого века.

Реконструкция такого оборудования, как правило, осуществляется путем замены горелок, сопровождаемой сменой или усовершенствованием топливопроводов, установкой впрыскивающих пароохладителей, заменой некоторых других узлов котла (конвективных поверхностей, экранов и т. п.), а также средств автоматики, которые должны обеспечить автоматизированное управление горелкой в соответствии с современными требованиями. Сообщается, что подобная модернизация позволяет увеличить мощность котла на 15–20 % при тех же габаритах и практически тех же затратах топлива.

Однако приоритетными среди энергосберегающих мероприятий являются малозатратные и быстрокупаемые технологии, позволяющие без значительных вложений добиться экономии топлива и электроэнергии. Предварительный анализ показал, что внедрение соответствующих средств контроля позволяет только за счет варьирования состава сжигаемой смеси достигнуть существенной экономии топлива.

Целью настоящей работы является разработка методов диагностики и регулирования процессов горения, ориентированных на повышение эффективности работы энергоблоков.

Для экономичной работы котлов первостепенное значение имеет поддержание оптимального соотношения топливо–воздух в зоне химических реакций. Для одnogорелочных агрегатов такая задача традиционно решается посредством регулирования состава топливной смеси на основе данных о концентрации кислорода в выходных газах [1, 2]. Однако для многогорелочных котлоагрегатов такой подход оказывается неэффективным из-за отсутствия возможности селективного контроля режимов горения в каждом факеле.

В Институте автоматике и электрометрии СО РАН разработан метод селективной дистанционной диагностики, основанный на измерениях пространственного распределения излучения пламени в специально выбранных спектральных диапазонах видимой и инфракрасной областей спектра, а также концентрации водорода и кислорода в продуктах горения, с последующим совместным анализом полученных данных [3].

Известно, что свечение, возникающее в процессе горения углеводородов, имеет две составляющие. Первая обусловлена излучением возбужденных продуктов горения (химлюминесценция). Его спектр состоит из отдельных линий и полос, интенсивность которых зависит от количества возникающих в результате химических реакций радикалов в возбужденном электронном состоянии (которое в свою очередь зависит от числа актов химической реакции), а также от вероятности их излучательной рекомбинации, зависящей от условий горения. Вторая составляющая излучения характеризуется непрерывным спектром (тепловое излучение). Она большей частью обусловлена свечением частиц веществ, находящихся в твердой или жидкой фазах. Спектральный состав этого излучения соответствует закону Планка для излучения черного тела, а его интенсивность зависит, в первую очередь, от количества в зоне горения частиц и их температуры. Кроме того, следует отметить также наличие излучения от нагретых элементов и конструкций.

Интенсивность всех составляющих излучения определяется условиями, в которых происходит сжигание топлива и, соответственно, несет информацию об этих условиях. Следовательно, с помощью измерения оптических параметров излучения в различных зонах котлоагрегата и комплексной обработки полученных данных имеется принципиальная возможность определения эффективности горения.

В случае многофакельного процесса горения задача определения эффективности осложняется влиянием излучения пламени соседних и встречных горелочных устройств на регистрируемые значения интенсивности. Степень этого влияния зависит от конструктивных особенностей котлоагрегата, а также от выбранных углов и направлений визирования датчиков. Данный фактор может быть минимизирован оптимальным выбором двух последних параметров, однако это делает процедуру монтажа чрезмерно сложной и нередко требует внесения изменений в конструкцию котла и/или горелочных устройств, что существенно сужает сферу применимости описываемой аппаратуры. Альтернативой этому процессу может служить применение предварительной процедуры, позволяющей выполнить определение коэффициентов влияния всех факелов на показания датчиков, с последующей интеллектуальной обработкой всего комплекса данных, с получением параметров излучения отдельного факела.

Для проведения исследований, направленных на разработку методов оптимизации процессов горения, разработана и создана оптико-электронная информационная система дистанционной диагностики высокотемпературных процессов [4].

Система состоит из базового блока и набора датчиков: фотоэлектронных датчиков факела, газоанализаторов кислорода твердоэлектролитных, газоанализаторов водорода МДП емкостных, и при необходимости может быть укомплектована дополнительными устройствами.

Все датчики сопряжены с базовым блоком по последовательному каналу RS 485. Система может включаться в состав АСУ ТП и сопрягаться с персональной ЭВМ. Информация о режимах работы каждой горелки и концентрации измеряемых компонент в уходящих газах выводится на монитор оператора в виде специального мнемотабло.

На первом этапе работы проводились исследования различных режимов горения в условиях отсутствия взаимного влияния факелов друг на друга. С этой целью система была установлена на теплоагрегате ДЕ 24/15, отличительной особенностью которого является наличие одного горелочного устройства.

Экспериментальные исследования проводились при фиксированном давлении газа, ступенчатом изменении давления воздуха и непрерывной регистрации измеряемых параметров. Причем давление воздуха принимало как большие, так и меньшие значения относительно оптимального. В результате получены данные об интенсивности свечения пламени и концентрации водорода и кислорода при семи различных уровнях расхода воздуха [5]. Выделены следующие закономерности:

- недостаток кислорода в смеси (режим “недожог”) приводит к повышению концентрации водорода и уменьшению концентрации остаточного кислорода в выходных газах,

- избыток кислорода (режим “пережог”) приводит к повышению концентрации кислорода в выходных газах, при этом концентрация водорода остается равной нулю,

- как уменьшение количества кислорода в смеси, так и его увеличение приводит к уменьшению интенсивности излучения факела, максимум интенсивности наблюдается при сжигании смеси оптимального состава.

Путем аппроксимации полученных экспериментальных данных установлено, что интенсивность излучения пламени при отклонении состава смеси от оптимального достаточно точно описывается полиномом четвертой степени, а концентрация кислорода и водорода носит линейный характер от показателя стехиометрии.

На втором этапе работы исследования проводились на многгорелочном котлоагрегате Сургутской ГРЭС-1 ТГ-104. Данный агрегат имеет 12 горелочных устройств, расположенных в два горизонтальных ряда на передней стенке котла (по 6 в ряд). Горелка № 1 расположена над горелкой № 7, № 2 — над горелкой № 8 и т. д. Продукты горения отводятся по двум дымоходам, расположенным в левой и правой частях котлоагрегата.

На каждую из горелок в штатное смотровое окно был установлен датчик факела, на дымоходах смонтированы газоанализаторы кислорода и водорода. В процессе исследований проводилось изменение режима подачи топлива попеременно на отдельных горелках и регистрация этих датчиков. Фиксировались следующие режимы: “рабочий” — соотношение газ–воздух близкое к стехиометрическому, “недожог” — горение при недостатке кислорода, “выключено” — прекращение подачи газа в горелочное устройство.

Установлено, что при уменьшении подачи воздуха на горелку (ориентировочно до уровня 30 %) интенсивность излучения ее факела падает (~20 %), Эти данные согласуются с результатами, полученными при исследованиях на

одногогорелочном котле. При дальнейшем уменьшении воздуха интенсивность излучения пламени резко возрастает (до 200 % и более), что свидетельствует о низкокэффе́ктивном горении, сопровождающемся образованием сажи. К сожалению, на данном котлоагрегате нет возможности оперативно контролировать расход воздуха селективно по горелкам, поэтому приведены лишь оценочные значения изменения расхода.

Кроме того, показано, что прекращение подачи газа в одну из горелок (при постоянном расходе топлива на котел), из-за его перераспределения, приводит к изменению интенсивности свечения факелов других горелок. На рис. 1 приведены данные об изменении сигналов датчиков факелов (в отн. ед.) в некоторых режимах (1, 3, 5 — работают все горелки, 2 — горелка № 5 погашена, 4 — горелка № 11 погашена). При гашении горелки верхнего ряда № 5 перераспределение газа (менее 10 % от общего расхода) приводит к различному эффекту на разных горелках. Интенсивность излучения, регистрируемая большинством датчиков верхнего ряда горелок, растет (до 10 %). Сигналы датчиков факела горелок нижнего ряда уменьшаются (также до 10 %). Учитывая, что горелки верхнего ряда котлоагрегата в обычном режиме работают при некотором недостатке топлива, а нижнего — при его избытке (такой режим обеспечивает наиболее эффективное сжигание), наблюдения подтверждают наличие локального максимума интенсивности излучения при оптимальном составе смеси.

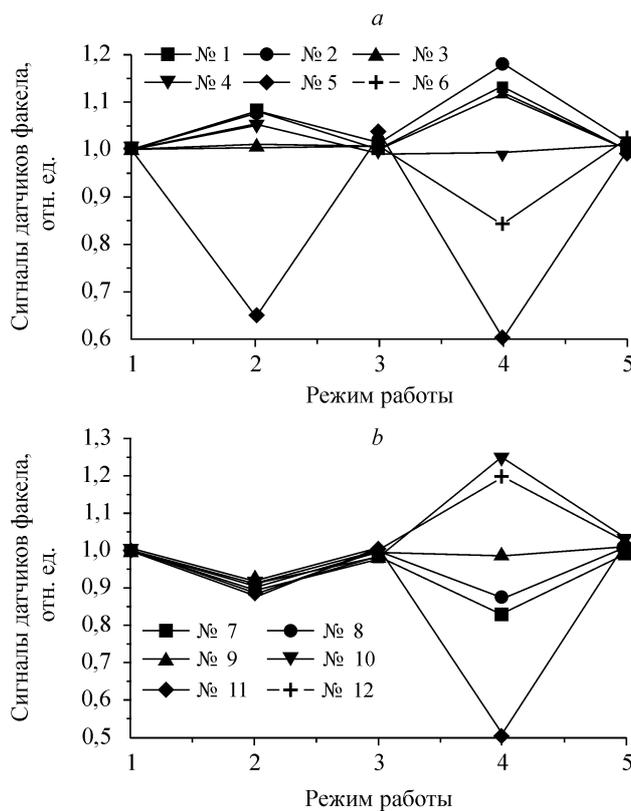


Рис. 1. Интенсивность излучения факелов горелок верхнего (а) и нижнего (б) рядов в различных режимах.

Закрытие газового клапана горелки нижнего ряда № 11 приводит к аналогичному результату для датчиков верхнего ряда № 1 (сигнал растет), нижнего ряда № 7, 8 (сигнал уменьшается). Однако показания датчиков факела горелок № 4, 6 и № 10, 12 ведут себя противоположным образом. Сигналы датчиков № 4–6 уменьшаются, № 10 и 12 — увеличиваются. Данный эффект, очевидно, вызван участием в горении кислорода, поступающего через грелку № 11 и приводящего к эффективному увеличению окислителя в смеси соседних горелок (а именно горелок № 4, 6, 10, 12).

При переходе в режим “выключено” горелок нижнего ряда сигналы соответствующих датчиков уменьшаются в 2 раза, изменение показаний горелок верхнего ряда не столь заметны (~35%). Однако при этом происходит увеличение амплитуды флуктуаций сигналов как минимум вдвое.

Показания газоанализатора водорода (рис. 2, *a*) при гашении одной из горелок и соответствующем перераспределении газа на остальные горелки увеличиваются, что свидетельствует о неполном сгорании топлива на работающих горелках энергоблока. Данные газоанализатора кислорода (рис. 2, *b*) в части котла, соответствующей остановленной горелке, также растут (через погасшую горелку продолжается подача воздуха), концентрация кислорода во второй части котла уменьшается (из-за избытка горючего).

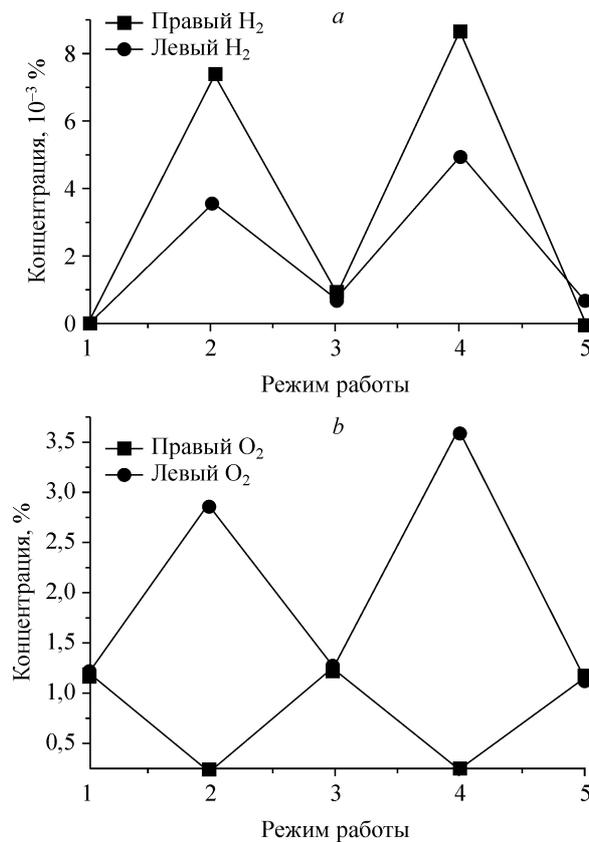


Рис. 2. Концентрация водорода (*a*) и кислорода (*b*) в правом и левом дымоходах котлоагрегата в различных режимах.

В результате выполненных исследований установлены основные закономерности изменения показаний датчиков системы диагностики, обусловленные изменением режимов горения и влиянием горелочных устройств друг на друга:

– частичное или полное закрытие заслонок на одной из горелок приводит к увеличению содержания соответствующего компонента в смеси на других горелках и изменению интенсивности излучения факелов,

– интенсивность излучения, регистрируемая датчиком, складывается из интенсивности контролируемого факела и фонового освещения от соседних факелов; особенно большое влияние оказывают факелы нижнего ряда горелок на показания соответствующих датчиков верхнего ряда,

– помимо кислорода, поступающего через каждую горелку, в реакциях горения также участвуют молекулы кислорода атмосферы внутри котла. Если горение на всех горелках идет в условиях, близких к стехиометрическим, то концентрация кислорода в котле очень низкая. Однако если на одну из горелок будет подана смесь с существенным избытком кислорода, это приведет к увеличению концентрации кислорода в соответствующей области котла, что вызовет эффективное увеличение кислорода в смеси соседних горелок.

Данные закономерности, несомненно, требуют детального исследования, однако на первом этапе они могут быть в некотором приближении представлены в виде линейных уравнений с коэффициентами, зависящими от конструктивных особенностей котлоагрегата и определяемыми экспериментально. Использование этих уравнений совместно с зависимостями характеристик излучения пламени и состава продуктов горения, полученными при исследованиях на одnogорелочном котлоагрегате, позволяет повысить селективность диагностики режима работы отдельных горелочных устройств.

На рис. 3 приведена структура разработанного алгоритма функционирования системы диагностики. При возникновении изменений в показаниях датчиков выполняются процедура итерационного подбора возможных возмущающих воздействий и расчет контролируемых параметров в соответствии с установленными закономерностями и сравнение расчетных значений с показаниями датчиков. Воздействие, приводящее к наибольшему соответствию данных, является наиболее вероятным.

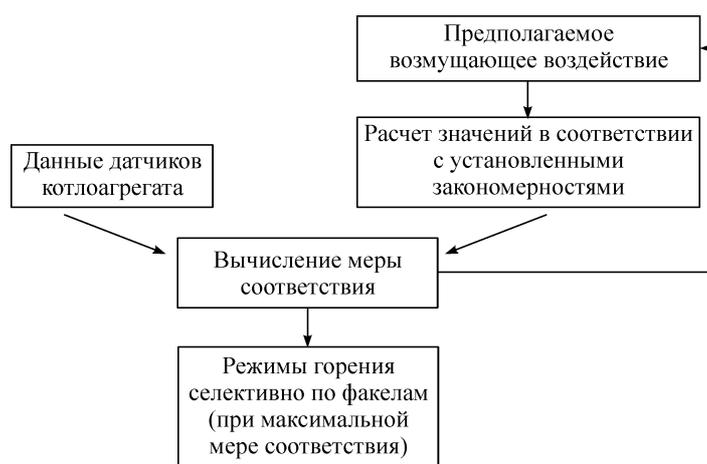


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения режима горения.

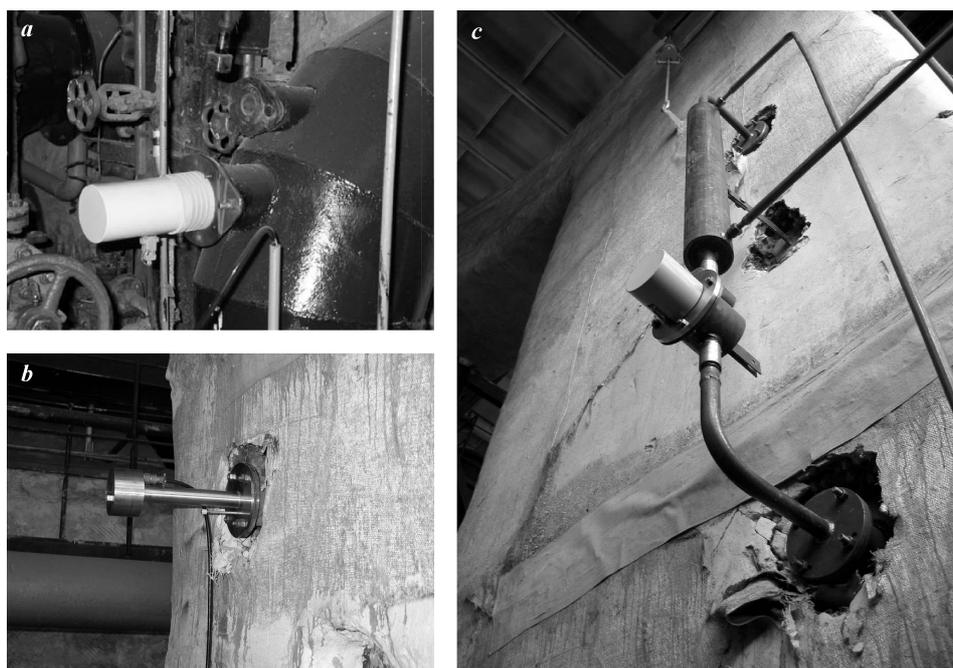


Рис. 4. Общий вид датчика факела (а), газоанализатора кислорода (b) и газоанализатора водорода (с), смонтированных на котлоагрегате.

Таким образом, показано, что в многорелочных котлоагрегатах изменение режима работы одного из горелочных устройств приводит к изменению всего комплекса контролируемых параметров, установлены основные закономерности этих изменений, разработан алгоритм определения режима горения, позволяющий существенно повысить селективность контроля отдельного горелочного устройства. Предложенный подход использован при разработке автоматизированной системы управления технологическими процессами тепловой станции № 1 ННЦ СО РАН. Проведены монтаж аппаратуры и пусконаладочные работы на котле № 6 (рис. 4), начаты исследования методов оптимизации горения с целью экономии газового топлива и повышения экологической безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тропин В.В., Будницкий А.М., Неуймин А.Д. Опыт применения твердоэлектrolитических газоанализаторов для контроля и регулирования режима горения // Совершенствование энергетического оборудования ТЭС. — УРАЛВТИ. Юж.-Урал. кн. изд., Челябинск. — 1991.
2. Шкаровский А.Л., Новиков О.Н., Окадьев А.Н. Энергоэкологические принципы управления процессом сжигания топлива // Датчики и системы. — 2002. — № 10. — С. 41–44.
3. Анцыгин В.Д., Борзов С.М., Васьков С.Т., и т. д. Оптимизация процессов горения на основе анализа параметров пламени // Автометрия. — 1999. — № 5. — С. 3–11.
4. Borzov S.M., Kozik V.I., Potaturkin O.I., Shushkov N.N. Optical-Electronic Information System for High-Temperature Processes Remote Monitoring // IASTED International Conference on Automation, Control, and Information Technology. — ACIT'2002 (Russia, Novosibirsk, June 10-13, 2002). — Proc. IASTED. — 2002. — P. 147–150.
5. Борзов С.М., Козик В.И., Потатуркин О.И., Шушков Н.Н. Оптимизация процесса горения газообразных углеводородов путем вариации состава топливной смеси // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 2. — С. 305–311.

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2006 г.