

**СЕЛЕКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА
МНОГОФАКЕЛЬНОГО ГОРЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

С. М. Борзов¹, С. Т. Васьков¹, О. И. Потатуркин^{1,2}, Ж. О. Шейшенов¹

¹*Институт автоматки и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: borzov@iae.nsk.su*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

Рассматривается задача селективной по факелам диагностики процесса горения в многогорелочных научных и промышленных установках. Определены основные факторы, обуславливающие реакцию оптических датчиков и газоанализаторов на изменение процессов в топочном пространстве, вызванных перераспределением топлива. Создана имитационная модель объекта исследования, учитывающая установленные зависимости. Предложен и продемонстрирован алгоритм селективного по факелам определения режимов горения, основанный на разработанной модели.

Введение. Одной из главных научно-технических проблем в области теплоэнергетики является повышение эффективности сжигания углеводородного топлива и снижение вредных выбросов в атмосферу. При этом первостепенное значение имеет задача поддержания оптимального соотношения топливо/воздух в зоне воспламенения каждого факела. Так, в результате обследования 4300 объектов, выполненного Департаментом энергетики США, Рутгеровским университетом, Ассоциацией инженеров-энергетиков, Центром анализа и распространения энергетических демонстрационных проектов (CADDET), было установлено, что весь потенциал энергосбережения от оптимизации режима горения топлива находится в пределах 20 %, при этом простая регулировка соотношения топливо/воздух на котлах позволяет достичь экономии топлива 2–3 % [1]. В соответствии с международным стандартом ISO9931 отклонение в расходах топлива по отдельным горелочным устройствам (ГУ) не должно превышать 5 %, а неравномерность в избытках воздуха – 3 %. Для достижения таких параметров необходимо совершенствовать методы селективной диагностики многофакельного горения.

Известны попытки разработки аппаратуры для контроля эффективности процесса горения, основанной на анализе параметров свечения пламени [2–5]. В частности, в работе [2] предлагается осуществлять такой контроль на основе информации об излучении пламени в полосах углекислого газа. Исследования показали, что зависимость интенсивности свечения CO₂ в по-

лосе 4,4 мкм от соотношения воздух/газ имеет максимум в области, близкой к стехиометрическому составу смеси. На основании этого факта разработан метод поиска максимума излучения. Предлагается вносить модуляцию определенной частоты в поток воздуха (или газа) на каждом ГУ и регистрировать уровень модуляции свечения на удвоенной частоте. При отклонении состава от оптимального модуляция свечения на удвоенной частоте уменьшается. Данный метод позволяет вести селективный по горелкам контроль эффективности процесса горения. Его недостатком является необходимость врезки в газовую или воздушную магистраль устройств для обеспечения модуляции потока. Помимо этого общим недостатком подобных подходов является попытка осуществлять независимый анализ параметров излучения отдельных факелов без учета их взаимного влияния.

В Институте автоматики и электрометрии СО РАН разработан метод селективной диагностики многофакельного горения, основанный на измерении пространственного распределения излучения пламени в специально выбранных спектральных диапазонах, а также концентрации водорода и кислорода в продуктах горения с последующим совместным анализом полученных данных [6]. Создан комплекс аппаратуры, состоящий из базового блока и фотоэлектронных датчиков факелов, твердоэлектронных газоанализаторов кислорода, МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) емкостных газоанализаторов водорода. Опытная эксплуатация этой аппаратуры в промышленных условиях показала ее надежность и высокие метрологические характеристики, однако для повышения селективности диагностики необходимо проведение дополнительных исследований и совершенствование алгоритмов обработки данных.

Для исследования сложных объектов в настоящее время широкое применение получил метод математического моделирования, в основе которого лежит замещение объекта его математической моделью [7–9]. Функционирование исследуемого объекта при этом может быть представлено в виде комплекса подсистем со сложными связями. Причем одна часть закономерностей, описывающих поведение подсистем, может быть известна теоретически, другая – установлена экспериментально, третья – иметь случайный характер или требовать дополнительных исследований и определения параметров в процессе модельных экспериментов.

Целью предлагаемой работы является создание алгоритмов анализа данных, основанных на применении принципов имитационного моделирования и направленных на повышение селективности (по факелам) диагностики процессов горения газообразных углеводородов.

Постановка задачи. При выработке тепловой энергии для обеспечения необходимых химических реакций углеводородное топливо смешивают с воздухом в определенной пропорции. Соотношение газа и воздуха в смеси принято характеризовать показателем стехиометрии α . Если соотношение правильное, $\alpha = 1$, сжигание происходит с максимальной эффективностью, топливо используется полностью и окончательными продуктами горения являются лишь углекислый газ и вода. Если же сжигание осуществляется при избытке воздуха в смеси, то в продуктах горения увеличивается концентрация кислорода. Недостаток воздуха приводит к увеличению концентрации горючих газов, в частности водорода. Топливо поступает в топочное пространство либо через одно горелочное устройство, тогда горение идет в однофакельном режиме, либо через несколько, в этом случае реализуется многофакельный режим. Обеспечить оптимальное сжигание в случае однофа-

кельного горения достаточно просто. Для этого необходимо контролировать концентрацию кислорода и водорода в продуктах горения и, регулируя соотношение газ/воздух в топливной смеси, поддерживать их на определенном уровне [10, 11]. Однако при многофакельном режиме измерения состава конечных продуктов химических реакций недостаточно, поскольку такой контроль является интегральным и не позволяет оценить эффективность горения в каждом факеле. В то же время очевидно, что селективную по пространству информацию можно получить на основе измерения оптических свойств излучения пламени.

Известно [12], что свечение, возникающее в процессе горения углеводородов, имеет две составляющие. Первая (хемиллюминесценция) обусловлена излучением возбужденных продуктов горения. Спектр этого излучения состоит из отдельных линий и полос. Их интенсивность зависит от количества возникающих в результате химических реакций радикалов в возбужденном электронном состоянии (которое, в свою очередь, определяется числом актов химической реакции), а также от вероятности их излучательной рекомбинации. Вторая составляющая излучения (тепловое излучение) характеризуется непрерывным спектром. Она в основном обусловлена свечением частиц углерода (сажи). Ее спектральный состав соответствует закону Планка для излучения черного тела, а интенсивность зависит от количества частиц и их температуры. Соотношение интенсивностей указанных составляющих определяется в первую очередь показателем стехиометрии.

Требуется разработать методы комплексной обработки данных системы диагностики, позволяющие повысить селективность контроля многофакельного горения.

Анализ экспериментальных данных. При исследованиях однофакельного пламени [13] экспериментально получена зависимость интенсивности излучения от α . В частности, показано, что при $\alpha = 1$ она имеет локальный максимум.

Исследования многофакельного процесса горения проводились в реальных условиях на котлоагрегате ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 с использованием разработанного комплекса аппаратуры [6]. Этот агрегат имеет 12 горелочных устройств, расположенных на его передней стенке в два горизонтальных ряда (ГУ1 над ГУ7, ГУ2 над ГУ8 и т. д.).

В процессе исследований регистрировались параметры излучения пламени в различных пространственных зонах (соответствующих первичным зонам горения каждого факела) и концентрация кислорода и водорода в продуктах горения при изменении режима подачи топлива [14]. Обработка полученных данных показала, что при постепенном уменьшении количества воздуха в газовой смеси относительно оптимального уровня интенсивность излучения факела сначала падает, а затем резко возрастает в области богатых смесей в результате образования частиц углерода.

Очевидно, что прекращение подачи газа в одно из ГУ (при сохранении общего расхода) приводит к увеличению его концентрации в других областях топочного пространства и соответственно к изменению параметров остальных факелов. Значения сигналов датчиков факелов в некоторых режимах приведены на рис. 1. Анализ полученных данных показывает, что в режиме II интенсивность излучения факелов верхнего ряда растет, а факелов нижнего ряда уменьшается. Учитывая, что ГУ верхнего ряда котлоагрегата в обычном режиме работают при некотором недостатке топлива, а нижнего ряда – при избытке (такой режим обеспечивает наиболее эффективное сжи-

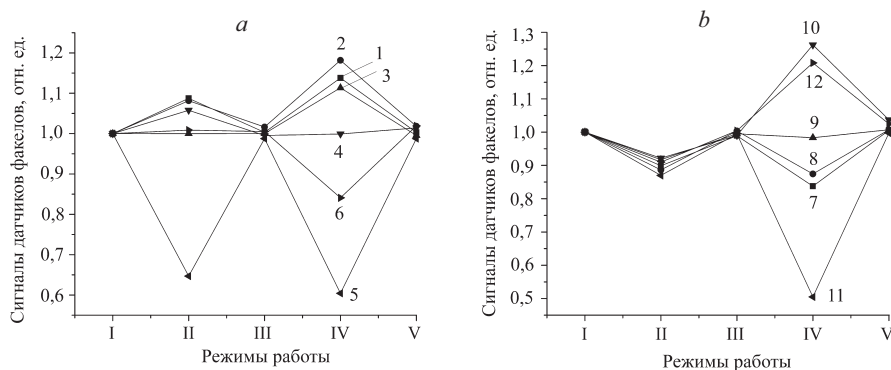


Рис. 1. Показания датчиков факелов в некоторых режимах (I, III, V – работают все ГУ, II – ГУ5 выключено, IV – ГУ11 выключено): *a* – верхний ряд, *b* – нижний ряд

гание), данные диагностики подтверждают наличие локального максимума интенсивности излучения пламени при оптимальном составе смеси.

В режиме IV интенсивность излучения ГУ1–ГУ3 растет (верхний ряд), а ГУ7, ГУ8 (нижний ряд) уменьшается. Однако в отличие от режима II показания датчиков факелов ГУ4 и ГУ6 уменьшаются, а ГУ10 и ГУ12 увеличиваются. Данный эффект, очевидно, вызван участием в горении кислорода, поступающего через ГУ11 и приводящего к эффективному увеличению окислителя в соседних пространственных зонах. Дело в том, что при условиях, близких к стехиометрическим, весь поступающий кислород выгорает и его концентрация в топочном пространстве низка. Если же на одно из ГУ поступает смесь с существенным избытком воздуха, это приводит к резкому возрастанию концентрации кислорода в соответствующей области и эффективному увеличению кислорода в смеси соседних ГУ.

Уменьшение сигнала датчика ГУ5 свидетельствует о существенном влиянии нижних факелов (в данном случае факела ГУ11) на показание датчиков верхнего ряда.

Таким образом, в результате исследований установлено, что при многофакельном горении имеется существенное влияние ГУ друг на друга, которое состоит из нескольких основных факторов:

- частичное или полное закрытие газовой заслонки на одном из ГУ приводит к увеличению газа в смеси на других ГУ, поскольку его общий расход поддерживается постоянным;

- интенсивность излучения пламени, регистрируемая датчиком, складывается из интенсивности контролируемого факела и некоторого фонового освещения, обусловленного соседними факелами, при этом особенно большое влияние оказывают факелы нижнего ряда на показания соответствующих датчиков верхнего ряда;

- помимо кислорода, поступающего через каждое ГУ, в реакциях горения также участвует атмосферный кислород внутри котлоагрегата.

Модель объекта исследования. Для учета указанных факторов (при анализе данных системы диагностики) разработана и создана адаптируемая имитационная модель многорелочного котлоагрегата. Входными параметрами модели являются общий расход газа и воздуха, степень открытия регулирующих заслонок на каждом ГУ, а выходными – показания датчиков факелов и газоанализаторов кислорода и водорода.

В модели использованы зависимости, описывающие:

- распределение газа и воздуха по ГУ;
- изменение интенсивности свечения факела и концентрации измеряемых компонент в дымовых газах от соотношения газ/воздух (установлены экспериментально на одnogорелочном котлоагрегате);
- влияние излучения соседних факелов на показания датчиков (определены в экспериментах на многогорелочном котлоагрегате);
- влияние атмосферного кислорода на горение.

Вычисление показателя стехиометрии для каждого факела в данной модели осуществляется в два этапа.

Вначале расчет ведется без учета влияния атмосферного кислорода. Поскольку компоненты топлива поступают в ГУ из магистральных трубопроводов и их расход поддерживается постоянным, расход газа V_{Γ}^i и воздуха $V_{\text{В}}^i$ для каждого ГУ вычисляется следующим образом:

$$V_{\Gamma}^i = V_{\Gamma} \beta_i / \sum_{i=1}^n \beta_i; \quad V_{\text{В}}^i = V_{\text{В}} \gamma_i / \sum_{i=1}^n \gamma_i, \quad (1)$$

где $1 \leq i \leq n$ (i – номер ГУ, n – количество ГУ); β_i – степень открытия газовой заслонки; γ_i – степень открытия воздушной заслонки i -го ГУ. При этом соотношение смеси K_i на каждом ГУ определяется в соответствии с выражением

$$K_i = V_{\Gamma}^i / V_{\text{В}}^i, \quad (2)$$

а показатель стехиометрии α_i для отдельного факела вычисляется как

$$\alpha_i = K_i / K_0, \quad (3)$$

где K_0 – оптимальное соотношение газ/воздух.

Вычисление интенсивности излучения пламени и концентрации остаточного кислорода и водорода для каждого ГУ осуществляется в соответствии с зависимостями, полученными на одnogорелочном котлоагрегате [5]. В частности, путем аппроксимации экспериментальных данных установлено, что интенсивность излучения пламени при отклонении состава смеси от оптимального достаточно точно описывается полиномом четвертой степени, а зависимости концентрации кислорода и водорода от показателя стехиометрии носят линейный характер.

Далее учет влияния атмосферного кислорода на процесс горения осуществляется с помощью добавки

$$\Delta V_{\text{В}}^i = \sum q_{ij} O_j; \quad \tilde{V}_{\text{В}}^i = V_{\text{В}}^i + \Delta V_{\text{В}}^i, \quad (4)$$

где q_{ij} – коэффициенты влияния остаточного кислорода j -го ГУ (O_j) на горение в факеле i -го ГУ. Затем повторяется расчет аналогично (2), (3).

При определении сигнала датчика факела каждого ГУ учитывается влияние излучения других факелов:

$$I_i = \sum_{j=1}^n l_{ij} I_j, \quad (5)$$

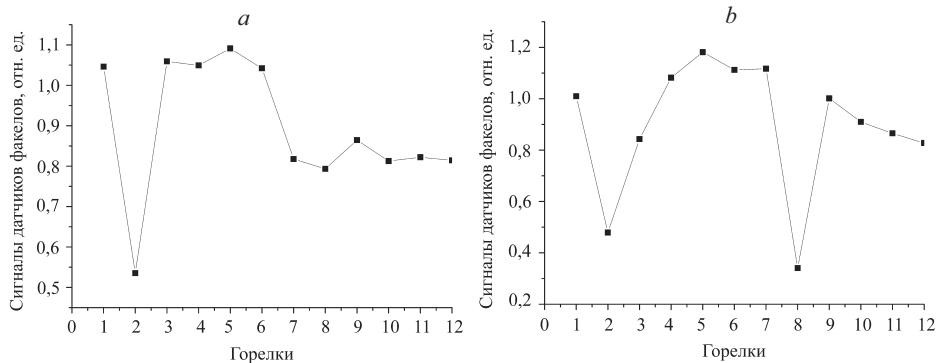


Рис. 2. Сигналы датчиков факелов, полученные в экспериментах после прекращения подачи газа в отдельные горелки: ГУ2 (а) и ГУ8 (б)

где l_{ij} – коэффициенты влияния факела j -го ГУ на показания датчика i -го ГУ ($l_{ii} = 1$).

Сигналы газоанализаторов кислорода и водорода при этом определяются в виде

$$O^m = \sum_{i=1}^n k_{im} O_i; \quad H^m = \sum_{i=1}^n k_{im} H_i, \quad (6)$$

где k_{im} – влияние i -го ГУ на газоанализатор m .

Приведенные выражения содержат ряд коэффициентов (q_{ij}, l_{ij}, k_{im}), значения которых зависят от конструктивных особенностей котлоагрегата и горелочных устройств. Эти значения должны быть определены при адаптации модели к конкретному типу котлоагрегата.

Предлагаемая модель, несомненно, является упрощенной, основанной большей частью на линейных приближениях существующих зависимостей. Однако исследования показали, что ее применение позволяет повысить селективность диагностики режима работы отдельных ГУ.

Диагностика режимов горения. Как уже упоминалось, в процессе работы котлоагрегата осуществляется непрерывный контроль интенсивности излучения факелов и концентрации кислорода и водорода в дымовых газах. Состояние котлоагрегата будем характеризовать показаниями датчиков факелов $\{I_1 - I_n\}$, образующими некоторую точку в n -мерном пространстве, а меру близости двух состояний – как расстояние между соответствующими точками. Любое изменение в режиме работы приведет к изменениям контролируемых параметров. Для определения произошедших изменений необходимо выполнить процедуру подбора возможных воздействий на компьютерной модели и сравнить ее выходные данные с показаниями датчиков.

Экспериментально полученные сигналы датчиков факелов котлоагрегата ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 после прекращения подачи газа в ГУ2 и ГУ8 показаны на рис. 2. Рассчитаем состояние модели котлоагрегата для различных значений степени открытия газовой заслонки на каждом из ГУ и определим меру близости этих состояний и состояния реального объекта после указанных воздействий:

$$F = \sum_i (I_i^{\text{нат}} - I_i^{\text{мод}})^2. \quad (7)$$

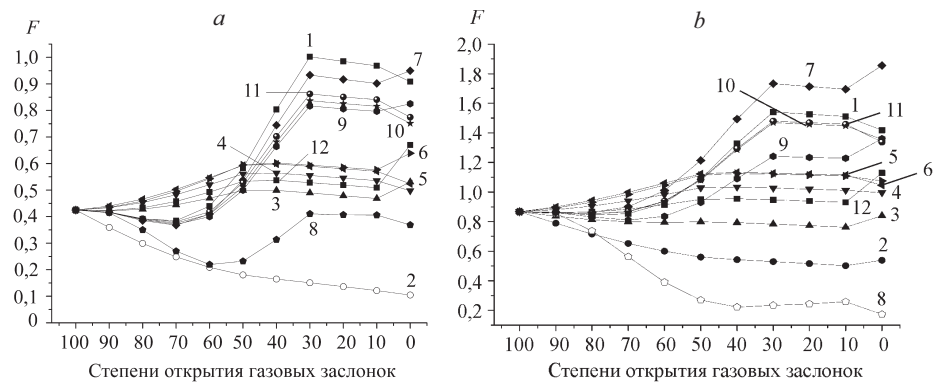


Рис. 3. Результаты расчетов соответствия модельных и экспериментальных данных при прекращении подачи газа: ГУ2 (а) и ГУ8 (б)

Результаты расчетов приведены на рис. 3, а, б. Видно, что наибольшее соответствие экспериментальных и модельных данных получено при полном закрытии газовых заслонок на ГУ2 и ГУ8. Здесь для наглядности использован простой перебор возмущающих воздействий.

Блок-схема алгоритма, реализующего решение этой задачи путем итерационного подбора с анализом промежуточных решений, представлена на рис. 4. В процессе контроля датчики системы осуществляют непрерывное измерение соответствующих физических параметров процесса. Для определения причины возникшего изменения при выходе сигнала какого-либо датчика факела из допустимого диапазона осуществляется подбор возмущения, вызывающего аналогичное изменение всех данных компьютерной модели котлоагрегата.

С этой целью определяется датчик факела с максимальным отклонением сигнала от исходного состояния: $\Delta I_i = I_{ik} - I_{im}$ (где I_{ik} – сигнал датчика факела i -го ГУ, I_{im} – выходные данные модели), после чего на компьютерной модели для соответствующего ГУ моделируются возможные воздействия (изменение степени открытия регулируемых заслонок газа и/или воздуха). Для каждого из этих воздействий определяется мера близости F реального и полученного с использованием модели состояний системы. По минимальному результирующему значению F фиксируется состояние ГУ. Если величина F оказывается больше заданного порогового значения F_0 , определяется ГУ, имеющее следующее по величине отклонение сигнала. Процесс повторяется до тех пор, пока не выполнится условие $F < F_0$. Таким образом, на основании исходного состояния котлоагрегата по изменению сигналов датчиков факелов определяется текущий режим работы каждого ГУ.

Далее для этого режима на модели рассчитывается концентрация кислорода и водорода и проверяется их соответствие реальным показаниям датчиков. При совпадении данных информация о состоянии котлоагрегата по результатам расчета модели выдается оператору, а показания датчиков факелов заносятся в базу модели. При их расхождении процедура расчета повторяется. Если после ряда итераций не удастся достичь совпадения модельных и экспериментальных данных о новом состоянии котлоагрегата, выдается сообщение о том, что настройка модели не соответствует объекту и требуется ее корректировка.



Рис. 4. Блок-схема итерационного алгоритма подбора вероятных возмущающих воздействий

Заключение. Таким образом, в результате исследований процессов однофакельного и многофакельного сжигания газообразных углеводородов установлены основные закономерности изменения интенсивности излучения пламени и компонентного состава уходящих газов. В данной работе создана имитационная компьютерная модель многорелочного котлоагрегата с учетом взаимного влияния факелов. Путем сравнительного анализа модельных и экспериментальных данных продемонстрирована ее адекватность объекту. Предложен алгоритм селективного по факелам определения режимов горения, основанный на разработанной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Herman-Milmoe P., Winkelman S. R.** Climate wise boiler and steam efficiency wise rules // Proc. of the Industrial Energy Technology Conference, Alliance to Save Energy. Houston, Texas: ICF Kaiser Consulting Group, 1998.
2. **Young K. J., Vara-Munoz M. C., Swithenbank J.** An alternative method of waste incinerator control // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Combustion and Emissions Control. London: Institute of Energy, 1995. P. 119.
3. **Von Drasek W., William A., Charon O., Marsais O.** Industrial combustion monitoring using optical sensors // Proc. SPIE. 1999. **3535**. P. 215.
4. **Zhou X. T., Wang J. D., Li Y., Liu D. B.** Real time diagnostics of instantaneous temperature of combustion and explosion process by modern spectroscopy // Spectroscopy and Spectral Analysis. 2003. **23**, N 2. P. 407.

5. **Pat. 10812431 US.** Flame quality and fuel consumption monitoring methods for operating a primary burner /R. D. Newberry. Publ. 12.06.2007.
6. **Анцыгин В. Д., Борзов С. М., Васьков С. Т. и др.** Оптимизация процессов горения на основе анализа параметров пламени // Автометрия. 1999. № 5. С. 3.
7. **Шидловский С. В.** Логическая система с перестраиваемой структурой в задачах управления технологическими процессами // Автометрия. 2005. **41**, № 4. С. 104.
8. **Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Идентификация параметров поля для подавления пульсаций момента синхронного двигателя с постоянными магнитами // Автометрия. 2006. **42**, № 2. С. 4.
9. **Абрамов А. И., Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н. и др.** Использование скользящего режима в управлении возбуждением синхронного двигателя // Там же. С. 10.
10. **Зверьков В. П., Кузицин В. Ф., Рожков В. Н.** Экономическая эффективность использования газоанализатора КГА-8С для оптимизации процесса горения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 10. С. 24.
11. **Шкаровский А. Л., Новиков О. Н., Окадьев А. Н.** Энергоэкологические принципы управления процессом сжигания топлива // Датчики и системы. 2002. № 10. С. 41.
12. **Гейдон А.** Спектроскопия пламен. М.: ИЛ, 1959.
13. **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. **11**, № 2. С. 309.
14. **Борзов С. М., Гаркуша В. В., Козик В. И. и др.** Селективная диагностика процессов горения в многогорелочных энергоблоках // Теплофизика и аэромеханика. 2006. № 2. С. 323.

Поступила в редакцию 17 апреля 2007 г.