

**Ф. Ф. Каримова, Т. Ф. Смагленко**

*Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова*

## **Влияние коэффициента избытка окислителя на скорость горения и спектр излучения пламени пропан-бутан-воздух**

В работе приводятся результаты исследования пламени предварительно перемешанной смеси пропан-бутан-воздух с помощью компьютерной обработки цифровых изображений факела. Получена зависимость нормальной скорости горения от коэффициента избытка окислителя. Показано, что распределение энергии в спектре пламени зависит от величины отношения газ/воздух. Предложен метод оценки коэффициента избытка окислителя по относительной интенсивности излучения в синей и зеленой части спектра.

Необходимость повышения эффективности сжигания органического топлива и снижения выбросов токсичных соединений (в первую очередь СО и NO<sub>x</sub>) в атмосферу диктуется как экономическими причинами так и экологическими требованиями. Как известно [1], коэффициент избытка окислителя  $\alpha$  в значительной мере определяет скорость горения, эффективность использования энтальпии топлива, а также содержание оксидов азота и монооксида углерода в отходящих газах. Поэтому перспективными являются следующие способы организации процесса сжигания [2]:

1. Предварительный подогрев воздуха (до 1000°C).
2. Сжигание газа при повышенном либо пониженном содержании кислорода в зоне горения.
3. Использование энтальпии отходящих газов с помощью их рециркуляции.
4. Двухступенчатое сжигание.
5. Увеличение теплоотдачи факела за счет повышения излучательной способности.

Для расчета режимных параметров процесса сжигания требуется знание механизмов теплопереноса, перемешивания и схем химических реакций образования токсичных продуктов при разных соотношениях топливо/кислород/инертный газ. Существующие методы численного моделирования позволяют найти оптимальный диапазон параметров сжигания для конкретного устройства. Но для реализации и поддержания расчетного режима горения необходимы сенсоры активного контроля основных характеристик процесса сжигания — температуры, коэффициента избытка окислителя и нормальной скорости горения.

Последние годы отмечены активным использованием ПЗС матриц в ка-

честве приемников излучения. По сравнению с традиционными приемниками излучения ПЗС матрицы обладают рядом преимуществ:

- Высокая квантовая эффективность, достигающая 80%, что обеспечивает чувствительность ISO 1200 и выше
- Чрезвычайно большой рабочий интервал спектра:  $0.1 \text{ нм} < \lambda < 1100 \text{ нм}$ .
- Линейность отклика в широком диапазоне экспозиций.
- Большой динамический диапазон, достигающий значения 50000 для самой матрицы, как правило ограниченный числом разрядов АЦП ( $D=2^n$ ).
- Высокая временная стабильность характеристик.
- Огромное число элементов изображения, достигающее сотен миллионов пикселей для мозаичных матриц.

Все это позволяет получать детальную информацию о пространственной структуре факела в режиме реального времени, своевременно регистрировать и корректировать отклонения параметров процесса от оптимальных значений. Высокое пространственное разрешение дает возможность контролировать однородность зоны горения, которая существенно влияет на стабильность процесса и содержание оксидов азота в продуктах сгорания. Как известно, локальные градиенты концентраций компонентов ведут к неравномерному сгоранию, возникновению температурных градиентов и, как следствие, повышенному образованию окислов азота. Использование цифровых камер позволяет варьировать в широких пределах время экспозиции, а также другие параметры съемки (чувствительность, контрастность, цветовая температура, формат изображения). При этом точность традиционных методов диагностики повышается за счет компьютерной обработки данных. В настоящее время активно развиваются методы компьютерной обработки цифровых изображений, разрабатываются соответствующие программные пакеты. Хорошие возможности для работы с изображениями обеспечиваются пакетом MatLab 6.5.

Цель данной работы состояла в определении зависимости нормальной скорости горения пропан-бутановой (50:50) смеси от коэффициента избытка окислителя  $\alpha$ , а также исследовании влияния  $\alpha$  на распределение энергии в спектре углеводородного пламени.

Установка для измерения скорости горения включает компрессор для подачи воздуха, баллон с газом (пропан-бутан), набор ротаметров, бунзеновскую горелку и цифровую камеру. Калиброванные ротаметры позволяют одновременно определять расходы газа, воздуха и газозоудушной смеси. Излучение пламени предварительно перемешанной смеси пропан-бутан-воздух регистрировали цифровой камерой OLYMPUS-2500L. Обработку изображений факела выполняли в пакете MatLab с помощью инструментария Image Processing Toolbox.

Нормальную скорость горения рассчитывали по формуле:

$$U_n = Q_{\Sigma} / S$$

где  $Q_z$  — расход газовой смеси, см<sup>3</sup>/сек, а  $S$  — площадь поверхности факела, см<sup>2</sup>.

Традиционно для определения  $S$  фронт пламени аппроксимируют конической поверхностью, измеряя только высоту факела, рассчитывают площадь фронта по формуле для боковой поверхности конуса. Данный способ характеризуется существенной методической ошибкой, величина которой возрастает при увеличении скорости горения и соответствующем уменьшении высоты факела. Кроме того, заметной может быть погрешность определения положения вершины факела, особенно при наличии пульсаций.

Для повышения точности определения  $U_n$  Дери предложил рассчитывать площадь поверхности усеченного конуса [2], при этом из рассмотрения исключаются вершина факела и зона, примыкающая к устью горелки. Расчетная формула при этом заметно усложняется, а погрешность уменьшается несущественно.

Поэтому была поставлена задача разработки стандартной методики определения положения фронта пламени и расчета площади его поверхности с минимальной погрешностью. Оптимальные условия съемки подбирались эмпирически. Было установлено, что при экспозиции, равной 1/100 сек изображение факела достаточно резкое.

Анализ полученных изображений показал, что границы факела в зеленом (G) и синем канале (B) не вполне совпадают: изображение факела в синей области спектра, формируемое излучением радикалов СН и ОН, является несколько размытым. Это связано с относительно высокой концентрацией радикалов гидроксила в зоне продуктов сгорания непосредственно за фронтом горения вследствие относительно медленной гибели их в реакциях трехчастичной рекомбинации. В то же время изображение факела в зеленом канале (полосы Свана радикала  $C_2$ ) имеет четко выраженные границы. Поэтому для определения положения фронта пламени использовали информацию зеленого канала, что обеспечило максимальное отношение сигнал/шум. Но в случае бедных смесей достаточный уровень сигнала обеспечивает только синий канал. Компьютерная обработка изображения включала медианную фильтрацию для уменьшения случайных шумов, бинаризацию с регулируемым порогом яркости (от 0.25 до 0.35) и выделение контура бинарного изображения факела.

Полученный контур аппроксимировали полиномом шестой степени, например, для контура, приведенного на рисунке:

$$y = -5.2 \times 10^{-10} x^6 + 4.1 \times 10^{-9} x^5 + 1.2 \times 10^{-5} x^4 - 3.4 \times 10^{-6} x^3 - 0.079 x^2 - 0.042 x + 150$$

Затем вычисляли площадь факела по известной формуле для поверхности вращения,

$$S = 2 \cdot \pi \int [1 + (dy/dx)^2]^{0.5} dx$$

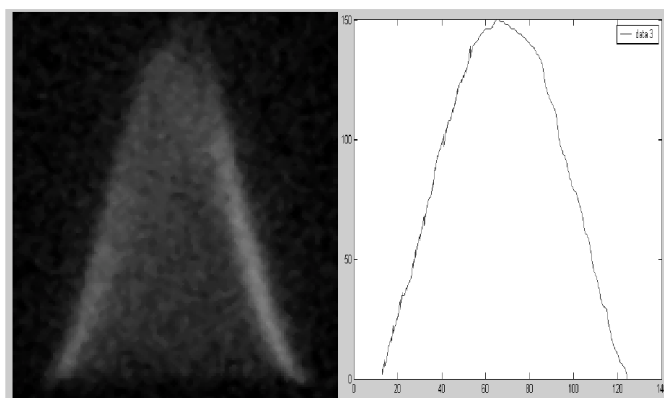


Рис. 1. Фотография факела и его контур,  $\alpha = 1.27$

Выполнены измерения нормальной скорости горения предварительно перемешанной смеси пропан-бутан-воздух для разных значений коэффициента избытка окислителя (см. Таблицу).

Таблица

**Зависимость нормальной скорости горения пропан-бутановой смеси от коэффициента избытка окислителя**

N	$Q_{\Sigma}$ , $\text{см}^3/\text{с}$	H, $\text{см}$	$S_{\text{con}}$ , $\text{см}^2$	$S_6$ , $\text{см}^2$	$U_{\text{n}^{\text{con}}}$ , $\text{см}^3/\text{с}$	$U_{\text{n}^6}$ , $\text{см}^3/\text{с}$	$\alpha$
1	113	3.4	6.0	5.2	18.8	21.7	0.94
2	125	2.2	3.9	4.2	32.1	29.8	1.03
3	125	1.7	3.1	3.23	40.3	38.7	1.06
4	133	1.8	3.26	3.28	40.8	40.7	1.11
5	140	1.6	2.9	3.7	48.3	37.8	1.18

Для сравнения приведены значения скорости, рассчитанные с помощью конического приближения. Видно, что при высокой скорости горения и, соответственно, малой высоте факела, коническое приближение приводит к существенной погрешности. Метод обеспечивает хорошую точность определения нормальной скорости горения и может быть использован для нестационарных пламен. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными [1].

Так как скорость горения и, следовательно, устойчивость факела сильно зависят от  $\alpha$ , актуальной является задача непрерывного контроля степени обогащения топливной смеси и качества перемешивания. Так как оптические методы диагностики отличаются высокой информативностью и отсутствием контакта с высокотемпературной агрессивной средой, им отдается предпочтение.

Хорошо известно, что спектральный состав хемилюминесцентного свечения углеводородных пламени зависит от отношения газ/воздух [3]: при высоком содержании окислителя (бедная смесь) преобладает излучение радикалов СН в синей части спектра (431.5 нм и 390 нм) и радикалов гидроксила ОН в ближнем ультрафиолете (306,4 нм), а при обогащении смеси существенно возрастает интенсивность полос Свана радикала  $C_2$  в зеленой области спектра (канты наиболее интенсивных соответствуют длинам волн 516.5 нм и 563.5 нм). Степень обогащения можно оценить визуально по цвету пламени, и естественно предположить, что отношение сигналов зеленой и голубой составляющих цветного изображения можно использовать для оценки коэффициента избытка окислителя. Обычно величину  $\beta$  определяют с отношением интенсивностей полос ОН и СН. Так авторы [4] предложили определять локальные значения коэффициента избытка окислителя по отношению интенсивностей излучения радикалов ОН ( $\lambda=310.4$  нм) и СН ( $\lambda=430.5$  нм). Измерения  $\alpha$  они проводили в предварительно перемешанном пламени природного газа с воздухом с помощью оригинального оптического датчика, включающего телескопическую систему Кассегрейна, интерференционные фильтры, фотоумножители и 12-битный АЦП. Было установлено, что отношение интенсивностей излучения указанных радикалов монотонно уменьшается по мере обогащения смеси и, следовательно, может быть использована для определения  $\alpha$ . Однако данный метод как и другие методы, описанные в литературе, требуют достаточно сложного оборудования. Поэтому была поставлена задача разработки простой методики определения  $\alpha$  с помощью цифровой камеры.

По аналогии с “сине-красным” отношением, используемым в пирометрии, мы ввели понятие “сине-зеленого” отношения:  $\gamma = B/G$ , где B и G, сигналы синего и зеленого каналов. Для определения зависимости  $\gamma(\alpha)$  фотографировали факел при фиксированном значении цветовой температуры  $T_{\text{ив}}=4000$  К в формате tiff. Как и следовало ожидать,  $\gamma$  меняется по высоте факела, поэтому было решено для определенности вычислять  $\gamma$  в зоне фронта, соответствующей радиусу  $r = 0.71R$ .

Были вычислены значения  $\gamma$  для изображений пламени при разных коэффициентах избытка окислителя. Полученная зависимость  $\gamma(\alpha)$  на рисунке 2.

Показано, что величина “сине-зеленого” отношения монотонно зависит от коэффициента избытка окислителя в диапазоне  $0.7 < \alpha < 1.3$  (данный диапазон ограничен пределами устойчивости факела) и, следовательно, может использоваться в качестве количественного критерия обогащения смеси при контроле процесса сжигания газа. Такую выраженную зависимость  $\gamma(\alpha)$  можно объяснить тем фактом, что интенсивность излучения полос Свана в пламени резко возрастает по мере обогащения топливной смеси:  $I(C_2) = k \cdot [C_xH_y]^n$ , где  $n=2 \dots 6$ , в зависимости от вида углеводорода [3].

Таким образом, разработаны методики определения параметров сжигания (нормальная скорость горения и коэффициент избытка окислителя) с

помощью компьютерной обработки цифровых изображений факела. Найдена зависимость нормальной скорости горения от коэффициента избытка окислителя при сжигании предварительно перемешанной смеси пропан-бутан-воздух.

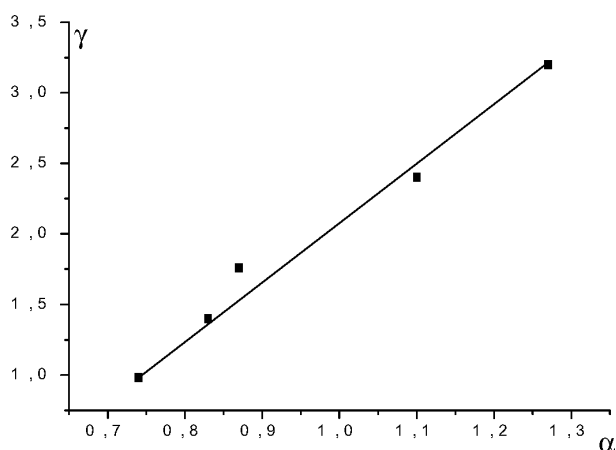


Рис. 2. Зависимость  $\gamma$  от коэффициента избытка окислителя

Определена зависимость отношения сигналов синего и зеленого каналов изображения факела от коэффициента избытка окислителя. Показано, что данное отношение может служить критерием степени обогащения топливной смеси.

В дальнейшем планируется продолжить исследования на плоской горелке, в том числе для других газов (метан, ацетилен).

#### Литература:

1. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. Москва. Мир. 1968. 392 с.
2. Ashwani K. Gupta. Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion// Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference Miami Beach, Florida, July 23-26, 2000, IJPGC2000-15087
3. А. Гейдон. Спектроскопия пламен. Москва: Изд. Иностранной литературы. 1959. 382 с.
4. Y. Hardalupas, M. Orain, C. S. Panoutsos, A.M.K.P. Taylor. Chemiluminescence sensor for local equivalence ratio of reacting mixtures of liquid fuel vapour and air// Mechanical Engineering Department, Imperial College London, London SW7 2AZ, U.K. 2002.

*Ф. Ф. Каримова, Т. Ф. Смагленко*

**Вплив коефіцієнта надлишку окислювача на швидкість горіння  
і спектр випромінювання газоповітряного факела  
пропан-бутан-повітря**

**АНОТАЦІЯ**

В роботі наведені результати дослідження полум'я попередньо перемішаної суміші пропан-бутан-повітря, за допомогою комп'ютерної обробки цифрового зображення факела. Визначена залежність нормальної швидкості горіння від коефіцієнта надлишку окислювача. Показано, що розподіл енергії в спектрі випромінювання полум'я залежить від величини співвідношення газ/повітря. Запропоновано метод оцінки коефіцієнта надлишку окислювача відносно інтенсивності випромінювання в синій та зеленій частині спектру.

*Karimova F. F., Smaglenko T. F.*

**Influence of equivalence ratio on flame propagation velocity  
and radiation spectrum of premixed propane-butane flame**

**SUMMARY**

Propane-butane-air premixed flame was studied by means of digital image processing. Dependence of flame velocity on fuel/air ratio was got. It was shown that energy distribution in radiation spectra depended on fuel/air ratio. A method of equivalence ratio evaluation by measuring local value of 'blue/green' ratio was described.