

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В УГЛЕВОДОРОДНОМ ПЛАМЕНИ ФОТОПИРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. Н. Бажайкин
(Новосибирск)

Определять температуры в углеводородных пламенах довольно сложно. Почти все углеводородные пламена обладают способностью светиться, что объясняется в основном тепловым излучением частиц сажи, присутствующих в пламени. Излучение сажи как твердого тела дает сплошной спектр в видимой области [1]. Наличие такого интенсивного сплошного спектра, который «забивает» полосатые спектры веществ с известными линиями излучения, делает невозможным применение спектральных методов определения температур, основанных на регистрации интенсивности полос излучения (поглощения) различных атомов и молекул. Поэтому предпочтительным для измерения температур является метод оптической пирометрии, который уже давно нашел применение, но обладает рядом недостатков.

Как известно, оптические пирометры измеряют так называемую яркостную температуру, т. е. температуру абсолютно черного тела, яркость которого в данном интервале длин волн одинакова с яркостью данного объекта. Яркостная температура может очень сильно отличаться (на несколько сотен градусов) от истинной температуры в зависимости от степени черноты исследуемого тела. Кроме того, при непосредственном измерении прибором трудно определить распределение температур по пространству пламени, а если процесс горения является быстропротекающим (как это имеет место в реальных камерах сгорания различных двигателей или энергетических установок), то практическая ценность метода значительно снижается.

Предлагаемая методика есть усовершенствование пирометрического метода определения температур светящихся пламен, она позволяет избавиться от перечисленных выше недостатков метода оптического пирометра и применима для исследования полей температур по тепловому излучению пламен. Суть методики заключается в фотографировании пламени совместно с калиброванными по яркостной температуре источниками света на определенной длине волны и соответствующей обработке фотографической информации с целью выделения на фотоматериале участков с одинаковой плотностью почернения (эквиденсит), соответствующих определенным яркостным температурам.

Таким образом, в предлагаемом методе соединены два известных и разработанных метода: пирометрическое определение истинных температур [2—4] и получение эквиденсит изображения на фотоматериале [5].

Методика. Для привязки температур пламени к эталонному источнику света применяется способ с использованием температурной лампы (лампа накаливания), где спираль заменена тонкой вольфрамовой лентой, яркостная температура которой зависит от силы электрического тока, поданного на лампу. Если перед лампой установить оптический клин, ослабляющий интенсивность излучения от ленты по определенному закону, и измерять оптическим пирометром яркостные температуры излучения за клином, можно получить набор интересующих температур, т. е. провести градуировку этой системы.

Во время опыта сначала измеряется пирометром яркостная температура S_{π} пламени в интересующей области, затем включается лампа с тем условием, чтобы максимальная яркостная температура после оптического клина S_{κ} была на $200 \div 300^{\circ}$ выше, чем S_{π} . После этого измеряется

яркостная температура ленты с клином через исследуемое пламя $S_{лп}$. Следует отметить, что измерения $S_{п}$ и $S_{лп}$ таким способом можно производить для стационарных пламен. При быстропротекающих процессах горения определить эти величины можно путем фотографирования пламени с градуированным источником света с последующей фотометрической обработкой снимка. Полученные значения яркостных температур позволяют определить истинные температуры в пламени $T_{п}$ и степень черноты пламени $\epsilon_{п}$.

Необходимые для этого формулы можно получить следующим образом. Если $B_{п}$ — яркость пламени и λ — длина волны света, на которой происходит определение яркостных температур, то на основании закона Планка можно написать

$$B_{п} = c\lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda S_{п}) = \epsilon_{п} c\lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T_{п}), \quad (1)$$

где c и c_2 — соответствующие константы. Далее получим

$$B_{лп} = c\lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda S_{лп}) = \epsilon_{п} c\lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T_{п}) + \epsilon_{п} c(1 - \epsilon_{п})\lambda^{-5} \exp(-c^2/\lambda T_{л}). \quad (2)$$

Здесь $B_{п}$ — яркость излучения ленты; $B_{лп}$ — яркость ленты, рассматриваемой через пламя.

Из (1) и (2) следуют выражения

$$1/T_{п} = 1/S_{п} + \lambda/c_2 \cdot \ln \epsilon_{п}, \quad (3)$$

$$\epsilon_{п} = 1 + \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{S_{п}} - \frac{1}{S_{лп}} \right) \right] - \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{S_{лп}} - \frac{1}{S_{л}} \right) \right], \quad (4)$$

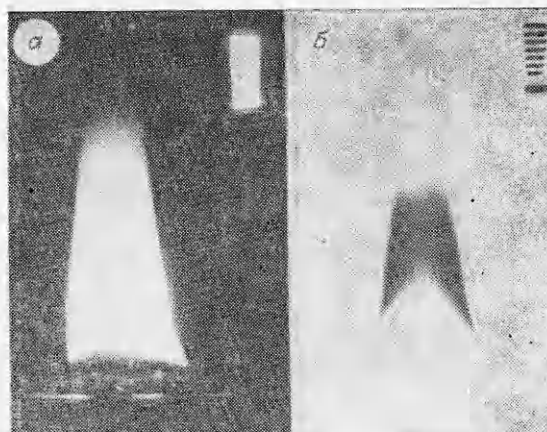
где $T_{п}$ — истинная температура пламени.

Таким образом, зная значения яркостных температур, можно определить степень черноты пламени $\epsilon_{п}$ по (4), а затем и истинную температуру пламени $T_{п}$ по (3). Фотографирование пламени совместно с калиброванным источником излучения позволяет получить информацию о температурных профилях в пламени в целом, и приемлемо как для медленных, так и быстропротекающих процессов горения — ограничение по времени экспозиции определяется светочувствительностью фотоматериала.

Расшифровать полученную информацию позволяет метод выделения участков с одинаковой плотностью особой обработкой фотоматериала, предложенный в [5], сущность которого заключается в следующем. Со снятого на фотопленке изображения контактной съемкой на фототехнической пленке получают несколько контрастных копий с разными временами экспозиций. Число копий и определит число выделяемых участков определенной плотности почернения (эквиденсит). Этим самым фотоинформация дифференцируется по плотностям почернения. С каждой полученной первичной копии изображение переносится контактным способом на другую пленку, которая затем проявляется. Через 30—60 с проявление прерывается и пленка промывается водой. При этом проявляется только поверхностный слой фотоэмульсии, где образуется тонкий слой серебра, который прикрывает нижележащие слои эмульсии. Далее пленка засвечивается рассеянным светом, после чего окончательно проявляется и фиксируется. При окончательном проявлении засвеченные участки пленки чернеют, а прикрытые слоем серебра остаются светлыми — это и есть эквиденситы.

Если обрабатывать таким способом фотографию пламени и калиброванного по температурам источника излучения, то на конечном фотоматериале останется участок пламени и участок источника излучения, температура которого заранее известна. Отсюда и можно узнать температуру выделенного участка пламени — изотермы. Повторяя перечисленные

Рис. 1. Фотографии пламени фитильной горелки и калибровочных ступеней, снятых во всем видимом диапазоне (а) и на длине волны $\lambda = 630$ нм (б).



операции с другими первичными копиями, будем иметь другие эквиденситы, соответствующие другим температурам. Если все полученные пленки смонтировать на едином планшете, можно получить семейство эквиденсит на одном снимке. Таким образом, любой сфотографированный объект, в частности пламя, можно представить в виде скелета, каждая часть которого обладает индивидуальными свойствами.

Результаты экспериментов. Объектом исследования служило плоское диффузионное пламя дизельного топлива высотой ~ 3 см, шириной $\sim 1,5$ см и толщиной 2—3 мм, полученное на фитильной горелке. В качестве эталонной лампы применялась светоизмерительная лампа СИ-8 с вольфрамовым ленточным телом накала, позволяющая градуировать температуры до 3000 К. Перед лампой устанавливался 9-ступенчатый оптический клин — набор нейтральных стекол с разной поглощательной способностью. Излучение вольфрамовой ленты, проходящее через оптический клин, наблюдалось оптическим пирометром с исчезающей нитью марки ОППИР-017 с целью определения яркостных температур, соответствующих каждому из девяти стекол. Сила электрического тока, подаваемого на лампу СИ-8, подбиралась с тем условием, чтобы диапазон яркости излучения вольфрамовой ленты, прошедшего через ступенчатый ослабитель, охватывал диапазон яркости излучения пламени, определенный предварительно. Причем ток, подаваемый на лампу как при калибровках, так и при фотографировании пламени и источника, поддерживался постоянным для постоянства яркости свечения ленты.

Фитильная горелка (спиртовка) с исследуемым пламенем устанавливалась в плоскости ступенчатого клина и производилась съемка фотоаппаратом «Киев-15», на объектив которого надевался интерференционный фильтр, пропускающий свет на длине волны $\lambda = 630 \pm 10$ нм. На рис. 1, а изображено исследуемое пламя и калибровочные ступени оптического клина, снятые без интерференционного фильтра (т. е. во всем видимом диапазоне длин волн) с выдержкой 1 мс. Рис. 1, б иллюстрирует то же самое, но снятое с той же выдержкой на длине волны $\lambda = 630$ нм. Здесь уже видны некоторые подробности строения пламени, а также характер ослабления интенсивности излучения вольфрамовой ленты оптическим клином, каждой ступени которого соответствует своя, заранее определенная яркостная температура.

После фотографирования пирометром, установленным в то же место, где помещался фотоаппарат, определялись яркостные температуры S_{π} и $S_{\lambda\pi}$ в различных участках светящейся зоны пламени, и затем по формуле (4) рассчитывался коэффициент черноты ϵ_{π} пламени для этих участков. В результате измерений и вычислений получился средний коэффициент черноты для исследуемого пламени дизельного топлива, равный $0,56 \pm 10\%$, который и брался для пересчета яркостных температур в истинные по формуле (3).

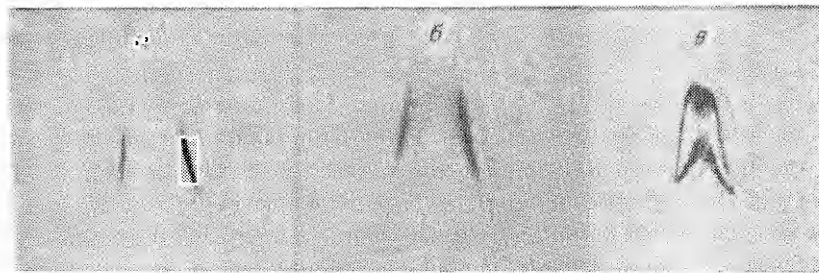


Рис. 2. Изотермы, выделенные из фотографии пламени горелки.
а) $T=1410^{\circ}\text{C}$; б) $T=1370^{\circ}\text{C}$; в) $T=1140^{\circ}\text{C}$.

Снятое на пленку изображение пламени и источника света (см. рис. 1, б) являлось исходным материалом для дальнейшей фототехнической обработки с целью получения эквиденсит-изотерм, согласно описанной выше методики. Обработка производилась на фототехнической пленке ФТ-101, имеющей высокий коэффициент контрастности $\gamma > 10$. Времена засветок и проявления фотоматериала определялись экспериментально и индивидуально для каждой эквиденситы.

На рис. 2 приведены результаты экспериментов, иллюстрирующие некоторые выделенные зоны — изотермы изучаемого пламени, представленные в одном масштабе с изображениями на рис. 1. Если совместить все полученные изотермы на одном рисунке, будем иметь некоторую картину, дающую представление о структуре данного пламени, что и видно из рис. 3. Плоское пламя получалось на горелке I, представляющей собой обычную спиртовку с плоским фитилем II. На рис. 1 и 3 видно, что светящаяся граница пламени III приподнята над фитилем на 3—5 мм, где происходит испарение и начальный нагрев паров жидкого топлива.

В пределах светящейся границы пламени просматриваются две темные зоны: IV — так называемый внутренний конус, где происходит дальнейший нагрев паров топлива и подготовка их к химическим реакциям, и V, в которой постепенно уменьшается светимость из-за охлаждения продуктов и образуется черная сажа. Из рис. 3 видно также, что зона максимальных температур почти совпадает с частью внешней границы пламени, где находится зона реакции горения диффузионного пламени.

По мере удаления от границы к центру пламени температуры монотонно убывают до минимально разрешенных данных методом.

Экспериментальная проверка полученных результатов на изучаемом пламени с помощью термопар дала только качественное соответствие. Количественные значения температур, измеренных различными термопарами, оказались ниже примерно на 30%. Это объясняется оседанием на спай слоя сажи, особенностями теплообмена пламени, спая и подводящих проводов, колебаниями пламени и т. д. Поэтому экспериментальная проверка метода проводилась на тест-объекте — вакуумметрической лампе марки ПМТ-2, внутри стеклянного баллона которой имеется платиновая проволочка диаметром 0,1 мм, к которой припаяна хромель-алю-

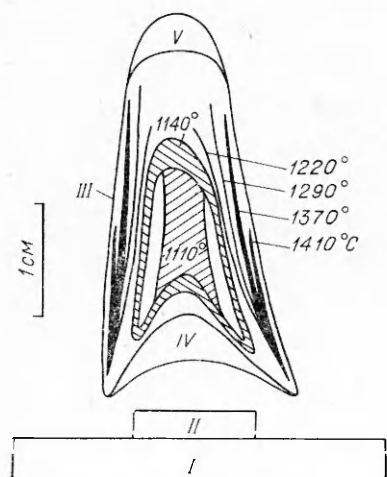


Рис. 3. Структура пламени фитильной горелки.

мелевая термопара (диаметр сная 0,1 мм). Проволочка нагревалась электрическим током. При установившемся тепловом режиме в лампе проводилось ее фотографирование совместно с эталонной лампой и оптическим клином. Значения температур проволочки, полученные фотопирометрическим методом и термопарой, отличались на 10—20° (или в среднем на 1,5%) для разных режимов нагрева (в диапазоне температур 1000—1100°C), что доказывает достоверность результатов, получаемых фотопирометрическим методом.

Следует отметить, что подобные пламена изучались и ранее. В работе [6], например, исследовалось пламя свечи, температуры в котором измерялись термопарами, причем принимались необходимые меры к уменьшению погрешностей измерений. Сравнение картины распределения температурных полей, полученной авторами [6] и приведенной на рис. 3, показало хорошее качественное и количественное согласие обоих методов и является показателем точности фотопирометрического метода.

Погрешность в определении истинных температур пламени складывается из двух составляющих: инструментальной и погрешности, связанной с эмиссионными свойствами пламени. Инструментальная погрешность связана с точностью измерения яркостных температур пирометром, а также с ошибкой при усреднении степени черноты пламени по светящейся области. Оценим ее количественно. Из формулы (3) следует,

$$T_{\pi} = 1/(1/S_{\pi} + \lambda/c_2 \cdot \ln \varepsilon_{\pi}),$$

откуда после дифференцирования и преобразований получаем выражение для относительной ошибки в определении истинной температуры (индекс π опускаем)

$$\frac{dT}{T} = \left(\frac{dS}{S^2} + \frac{\lambda}{c_2 \varepsilon} d\varepsilon \right) / \left(\frac{1}{S} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon \right). \quad (5)$$

Расчет проводится для следующих условий: $dS = 20^\circ$ — ошибка в измерении яркостных температур пирометром в диапазоне 1000—1400°C, $S = 1000^\circ\text{C}$ — низшая яркостная температура диапазона (чтобы ошибка была максимальной), $\varepsilon = 0,56$ — средняя степень черноты, $d\varepsilon = 0,056$ — ошибка от усреднения степени черноты по пламени, $\lambda = 630 \cdot 10^{-9}$ м, $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м/град. Из (5) получаем $dT/T = 2,2 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, абсолютная инструментальная ошибка составляет 2% в данном диапазоне температур.

Погрешность, связанную с особенностями излучения пламени, трудно оценить количественно и можно давать только рекомендации к ее уменьшению. Воспринимаемая приборами яркость объемного источника излучения является результатом как наложения, так и поглощения интенсивности излучения от разных точек излучателя вдоль оптического пути к прибору. Поэтому для объемных источников необходимо учитывать и рассчитывать радиальное распределение температур и решать интегральное уравнение Абея. В данном случае (плоское пламя) эта необходимость отпадает. Ошибки могут быть также из-за наложения на излучение частиц углерода излучения других молекул на рабочей длине волны. Поэтому для уменьшения этой погрешности рекомендуется регистрация излучения на двух или нескольких длинах волн. В пламенах, богатых содержанием углерода, особенно тяжелых углеводородных топлив (как и в данном случае) наложение постороннего излучения мало влияет на точность измерения температур.

В заключение автор выражает благодарность А. П. Петрову за ряд ценных советов и замечаний.

Поступила в редакцию
24/VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Гейдон. Спектроскопия пламени. М., ИЛ, 1959.
2. А. И. Гордов, А. С. Аржанов и др. Методы определения температур в промышленности. М., Metallurgizdat, 1952.
3. H. Hottel, F. Braughton. Ind. Eng. Chem., 1932, 4.
4. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Диффузионное горение жидкостей. М., Изд-во АН СССР, 1961.
5. В. Круг, Г. Г. Вайде. Применение научной фотографии. М., Мир, 1975.
6. А. Г. Гейдон, Х. Г. Вольфгард. Пламя, его структура, излучение и температуры. М., Metallurgizdat, 1959.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНА С ЭЛЕМЕНТАМИ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА

*В. И. Итин, А. Д. Братчиков, А. Г. Мержанов,
В. М. Маслов*

(Томск, Черноголовка)

В настоящей работе изучены закономерности процессов СВС соединений титана с кобальтом (TiCo) и в ряде случаев с никелем (TiNi) и железом (TiFe). Определено влияние различных факторов (пористости, начальной температуры, степени разбавления состава конечным продуктом, величины теплотеря и т. д.) на скорость, температуру и характер горения, а также фазовый состав и структуру конечных продуктов синтеза.

Точки плавления указанных соединений ниже, чем реагентов. Этот случай при горении ранее не изучался. Продукты реакции могут быть жидкими, что приводит к некоторым особенностям процесса горения. Интерметаллические соединения TiCo и TiNi обладают эффектами памяти формы и другими полезными свойствами. В связи с использованием СВС для получения таких фаз [1—3] представляется целесообразным подробное изучение закономерностей горения этих составов.

Для исследования, методика которого полностью соответствует [2], использовались составы и порошки, указанные в табл. 1. Все составы слабоэкзотермичны и воспламеняются только после предварительного нагрева системы. Синтез состава 5 (стехиометрия TiFe) удалось возбудить только после нагрева системы до 900°C, при этом максимальная температура горения равна 1150°C.

На рис. 1 представлены зависимости максимальной температуры $T_{\max}$ и скорости горения u от начальной температуры T_n . Можно выделить две области зависимости $T_{\max} = f(T_n)$:

1) температура горения превышает точки плавления эвтектик, но ниже точек плавления реагентов и конечного продукта, при этом она растет с увеличением начальной температуры процесса;

2) температура горения во всем интервале начальных температур процесса равна точке плавления продукта.

Скорость горения для всех составов плавно повышается с ростом T_n , а затем при $T_{\max} = T_{\text{пл. пр}}$ наблюдается резкий скачок на кривой зависимости $u = f(T_{\max})$, как это наблюдалось ранее в процессе СВС NiAl [4]. Разбавление ($b = 20\%$) состава 4 конечным продуктом не влияет на характер зависимости максимальной температуры и скорости горения от начальной температуры (см. рис. 1). Область 1 сдвигается в сторону более высоких температур, соответственно падает скорость горения.