

МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

УДК 654.949

В. Д. Анцыгин, С. М. Борзов, С. Т. Васьков, А. С. Зензин, В. И. Козик,
О. И. Потатуркин, Л. В. Финогенов, Н. Н. Шушков

(Новосибирск)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАМЕНИ ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Предлагается оптико-электронный дистанционный метод контроля параметров газового пламени, основанный на принципах пассивной оптической спектроскопии с использованием собственного излучения факелов и последующей цифровой электронной обработки полученных данных. При этом регистрация излучения осуществляется в нескольких фиксированных диапазонах в видимой и ИК-областях спектра, преобразование излучения в электрический сигнал выполняется многоэлементными полупроводниковыми фотоприемниками с преимущественным использованием одной координаты и возможным оптическим интегрированием по другой пространственной координате, цифровая обработка полученных данных осуществляется с помощью локальных и поточечных операторов обработки изображений.

Селективный (по пространству) контроль параметров пламени газообразных углеводородов является актуальной проблемой в энергетике, экологии, при обнаружении факелов в атмосфере, для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности в промышленности и т. п. В настоящее время известно большое количество методов, в том числе бесконтактных, которые могут быть использованы для ее решения. Причем последние имеют определенные преимущества, поскольку основаны на регистрации различных параметров оптического излучения (интенсивность, фаза, частота пульсаций, спектральный состав) и, следовательно, не вносят возмущений в газовый поток, более технологичны и эксплуатационно эффективны, а также применимы в широком температурном диапазоне [1]. Однако до сих пор в стране отсутствует простая и надежная контрольно-измерительная аппаратура, предназначенная для этих целей. Дело в том, что в предыдущие годы усилия в данной области были преимущественно направлены на исследование и оптимизацию процессов горения при высоких или низких давлениях. К процессам же горения при нормальном давлении интерес возник лишь недавно из-за необходимости решения перечисленных выше практических задач. Подтверждением этому является большое количество зарубежных патентов, появившихся буквально в последние годы. Основные особенности здесь заключаются в сложности и неравновесности физико-химических реакций, зависящих от давления, температуры, структуры пламени. По этой причине спектральный состав, пространственное и температурное распределение излучения в значительной степени подвержены изменениям. Кроме того, из-за недостаточного количества столкновений молекул процесс горения в атмосфере не приходит в термодинамическое равновесие. Спектр излучения в этом случае отличается от непрерывного спектра

черного тела при той же температуре и имеет характерную линейчатую структуру. Причем существуют достаточно стабильные и информативные линии излучения, регистрация интенсивности которых при определенных условиях дает возможность успешно решать проблемы исследования характеристик газового пламени и контроля его параметров в условиях высоких температур ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) и нормального давления. Поэтому с учетом результатов предварительных экспериментальных исследований бесконтактных методов можно сделать вывод о перспективности подхода на основе многозональной регистрации излучения.

Таким образом, цель работы заключается в исследовании эффективности дистанционного метода контроля параметров газового пламени на принципах пассивной оптической спектроскопии с использованием собственного излучения факелов в специально выбранных спектральных диапазонах и последующей цифровой электронной обработки полученных данных. При этом основными задачами являются:

- определение наиболее информативных и стабильных диапазонов излучения пламени в видимой и ближней ИК-областях спектра для различных пространственных областей факела;

- определение оптимального (с точки зрения пространственной и температурной стабильности спектров пламени) направления визирования излучения факелов;

- исследование кинетики погасания и нагрева на примере конкретной газовой смеси;

- экспериментальное исследование разработанной и созданной оптико-электронной (ОЭ) аппаратуры в режиме автоматизированного контроля параметров газового пламени.

Проведенное исследование пламени газообразных углеводородов (на примере пропановоздушной смеси) при нормальной к направлению факела регистрации показало, что его спектральный состав существенно зависит от местоположения области, из которой световой поток проецируется оптической системой во входную плоскость монохроматора. Это обусловлено, прежде всего, неоднородным распределением плотности возбужденных промежуточных продуктов горения (радикалов CH , C_2 , OH и т. п.) и температуры вдоль факела. Поэтому предложено для определения зависимостей процесса горения от температуры, состава смеси и других параметров выполнять измерения спектрального состава света по направлению оси факела.

Такая геометрия регистрации позволяет устранить влияние неоднородности спектральных свойств пламени [2] и уменьшить влияние пространственных флуктуаций на результаты измерений за счет усреднения излучения по физически большему объему факела. Это крайне важно в прикладных задачах, поскольку, как показала практика [3], отрыв пламени от сопла горелки вносит ложную тревогу в систему защиты даже при устойчивом горении.

Спектроскопические исследования выполнялись на установке, блок-схема которой представлена на рис. 1. В этих экспериментах излучение факела пропановоздушной горелки собиралось конденсором (Л) и проецировалось на входную щель монохроматора МДР-23. Для защиты оптики от перегрева тепловым потоком факела использовался обдув воздухом оптических элементов на входе системы (В).

Для регистрации интенсивности излучения пламени после монохроматора в качестве фотоприемника использовался ФЭУ-114. С целью повышения помехоустойчивости и устранения фоновых паразитных подсветок применялась модуляция светового потока на входе монохроматора (М), усиление и выпрямление переменного сигнала ФЭУ на частоте модуляции $\sim 350\text{ Гц}$ с помощью селективного нановольтметра "Унирап-233". Распределение интенсивности излучения факела по длинам волн фиксировалось на самописце Н306, а определение температуры пламени осуществлялось с помощью платино-платиноподиевой термпары (ТП).

На рис. 2 представлены типичные спектры интегрального излучения пламени пропановоздушной горелки, записанные со спектральным разрешением

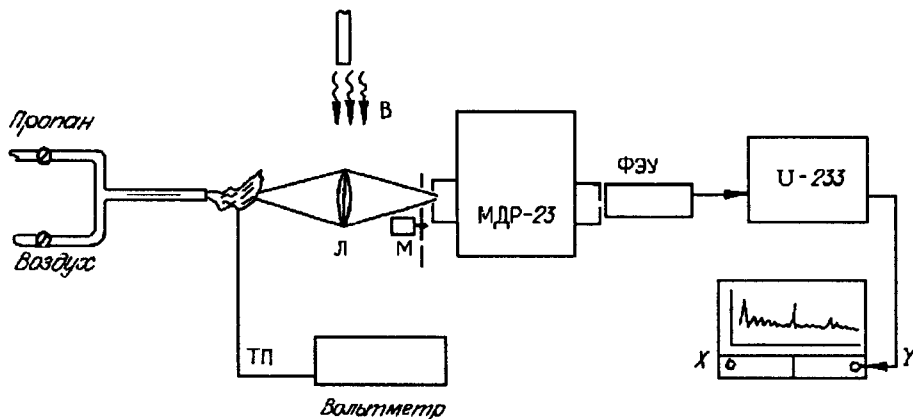


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для спектральных измерений излучения пламени

0,1 нм при разных максимальных температурах факела. Из приведенных спектров видно, что в видимом диапазоне длин волн наблюдаются три основные группы линий: радикала СН (431—438 нм), радикала C_2 (467—472, 513—516, 559—564 нм) и возбужденных молекул воды H_2O (591, 616—625 нм) [4].

В табл. 1 представлены относительные значения интенсивности излучения радикалов СН, C_2 и фонового излучения пламени ($\lambda = 700—1100$ нм) при разных значениях максимальной температуры факела. Для определения изменений спектра пламени с ростом температуры проведена нормировка всех значений интенсивностей на соответствующие значения при 1000 °С.

Как видно из рис. 2 и табл. 1, при повышении температуры факела наблюдается значительный рост интенсивности линий излучения радикалов СН и C_2 в сине-зеленой области спектра. Отметим, что данные, представленные в табл. 1, хорошо коррелируют с результатами, полученными при нормальной к направлению факела регистрации излучения его средней части.

Исследование кинетики свечения факела при его погасании и определение соотношений интенсивности проводились на основе спектральных измерений излучения пламени модифицированной пропановоздушной горелки. На рис. 3 изображена ее новая конфигурация. На сопло 1 надета кварцевая трубка 2 с электронагревателем 3 и термопарой 4. Для устранения попадания в измерительный канал излучения электронагревателя использовался экран 5.

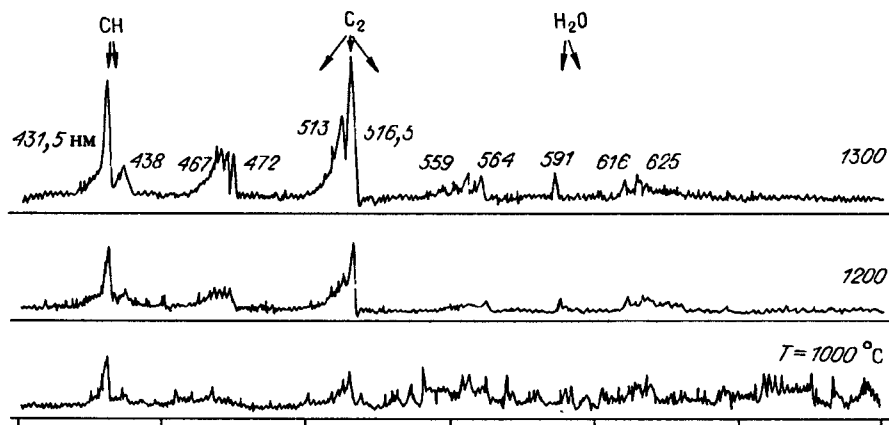


Рис. 2. Спектры интегрального излучения пропановоздушной горелки

Таблица 1

T, °C	λ, нм			
	431	467	513—516	700
1000	1	1	1	1
1200	1,2	2,4	2,0	1,1
1300	2,2	5,7	4,1	1,5

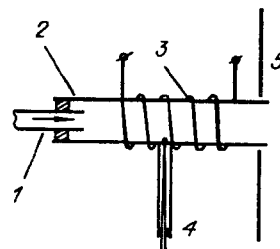


Рис. 3. Конфигурация модифицированной пропановоздушной горелки

Измерения выполнялись следующим образом. При фиксированном потоке воздуха через горелку в объеме кварцевой трубки (в «термостате») с помощью электронагревателя устанавливалась заданная температура. После этого открывалась подача газа и зажигался факел. Регулировкой поступления газа устанавливалась необходимая температура горения, которая измерялась платино-платинородиевой термопарой. С помощью монохроматора, ФЭУ и временной развертки сигнала на самописце регистрировались изменения интенсивности излучения во времени в заданном спектральном диапазоне. После регистрации интенсивности излучения подача газа в горелку прекращалась на некоторое время (10—30 с), а затем в нее вновь подавался пропан.

Кинетика излучения факела в различных областях спектра представлена на рис. 4. Как видно из этого рисунка, при срыве пламени горелки наблюдается резкое уменьшение интенсивности излучения газовой смеси. Последующее включение подачи газа и наблюдаемое возрастание температуры газовой смеси от температуры «термостата» до 650—670 °C не приводит к появлению заметного неравновесного излучения радикалов в видимой области спектра. При этом отношение интенсивностей свечения радикалов горячей газовой смеси к свечению нагретой, но не горячей смеси превышает 100 раз.

С целью изучения особенностей самовозгорания газовой смеси выполнены измерения зависимости ее температуры во времени от начальной температуры «термостата» T_0 , которая устанавливалась при фиксированной подаче воздуха в горелку с помощью электронагревателя. Поведение температуры газовой смеси вблизи стенки кварцевой трубки во времени после подачи пропана в горелку представлено на рис. 5. Отметим, что в равновесных условиях ее значение в центре трубки ниже температуры внутренней стенки на ~30 °C.

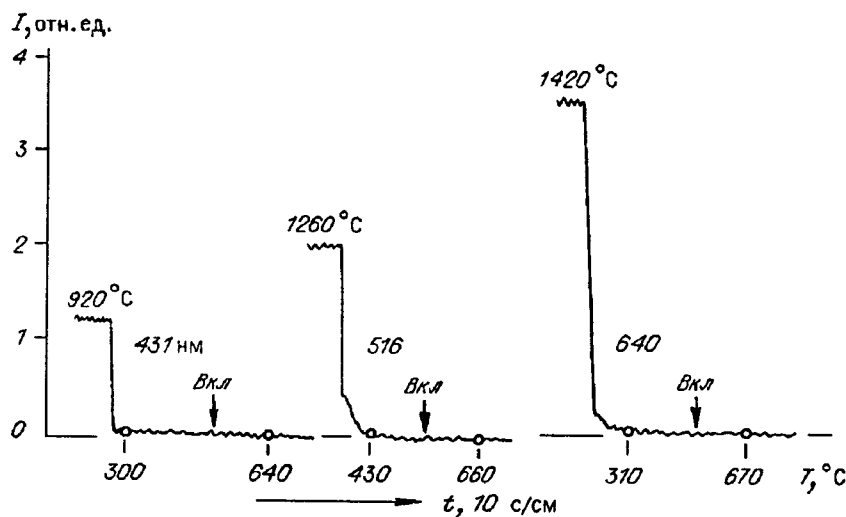
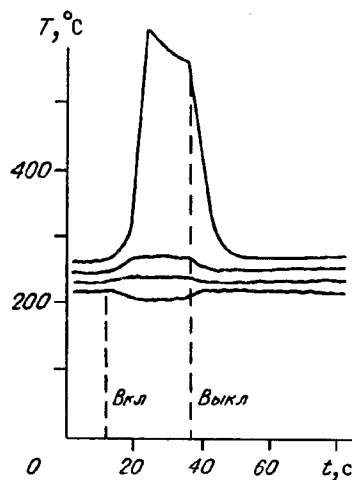


Рис. 4. Кинетика излучения факела

Рис. 5. Зависимость температуры газовой смеси от начальной температуры «термостата»

Из рис. 5 видно, что поведение температуры пропановоздушной смеси существенно зависит от начальной температуры «термостата». Так, если начальная температура $T_0 \leq 220^\circ\text{C}$, то включение подачи газа в горелку приводит к незначительному понижению температуры смеси, которое исчезает при выключении подачи газа. При $T_0 \geq 250^\circ\text{C}$ наблюдается увеличение температуры газовой смеси, причем чем выше T_0 , тем быстрее происходит нарастание температуры. Отметим, что при этом в области термопары температура смеси превышает температуру ее самовозгорания ($T_c = 550^\circ\text{C}$) и достигает значений $650\text{--}670^\circ\text{C}$.



При температурах «термостата» выше 500°C при подаче газа происходит образование фронта горения на внешнем торце кварцевой трубки. Этот фронт пламени быстро пробегает внутрь и затем устанавливается на сопле горелки, создавая устойчивое горение с неравновесным излучением пламени.

Полученные результаты легли в основу предложенного дистанционного метода контроля параметров пламени газовых углеводородов, заключающегося в регистрации пространственно распределенных информационных сигналов в сине-зеленой области спектра и опорного сигнала в ближнем инфракрасном диапазоне с последующей обработкой полученных данных. Причем формирование изображений факелов осуществлялось преимущественно по одной координате, а оптическое интегрирование — по другой. Эти результаты были использованы также при разработке автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры, состоящей из проекционного оптического блока и ОЭ-датчика, сопряженного с персональной ЭВМ (рис. 6).

Проекционный блок предназначен для выделения спектральных диапазонов и проективного сопряжения плоскости факелов и приемной плоскости ОЭ-датчика. Он состоит из трех основных компонент: 1 обеспечивает проецирование изображения пламени во входную плоскость световода, 2 служит для обеспечения тепловой развязки между ОЭ-датчиком и объектом контроля, а 3 осуществляет выделение заданных спектральных диапазонов и проективное сопряжение выходной плоскости световода и входной плоскости ОЭ-датчика. При этом спектральные диапазоны в коротковолновой области выбраны из соображений возможно более полного разделения излучения радикалов CN и C_2 при максимальном световом потоке в каждом диапазоне, а в длинноволно-

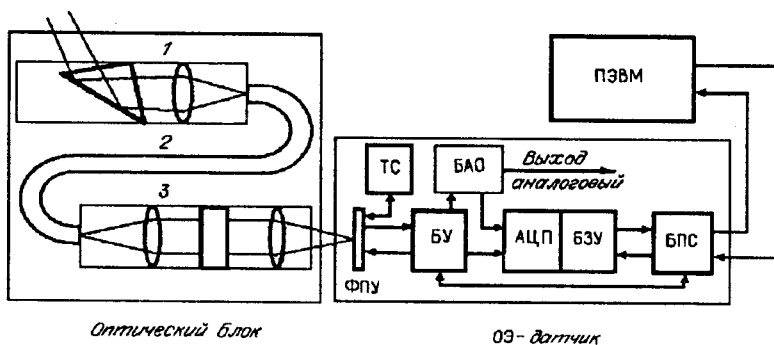


Рис. 6. Блок-схема системы автоматизированного контроля параметров газового пламени

вой области — таким образом, чтобы опорный сигнал по порядку величины совпадал с информационными сигналами для последующей дифференциальной обработки данных между каналами.

ОЭ-датчик обеспечивает считывание одномерного светового распределения с интегрированием интенсивности по другой пространственной координате в каждом из спектральных диапазонов, аналого-цифровое преобразование и ввод информации в ЭВМ. При этом область интегрирования определяется параметрами как проекционного оптического блока, так и фотоприемного устройства (ФПУ).

Оптико-электронный датчик состоит из ФПУ, термостабилизатора (ТС), блока управления (БУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с буферным запоминающим устройством (БЗУ) и блока последовательной связи (БПС). Кроме того, предусмотрен блок аналоговой обработки данных (БАО). В качестве фотоприемного устройства в датчике используется фотодиодная линейка ФУК 1Л2, содержащая 1024 фоточувствительных элемента. Размер элементов 20×150 мкм, шаг расположения 25 мкм. Для увеличения сигнала с ФПУ производится одновременное попарное считывание четных и нечетных элементов. Таким образом, выходной сигнал содержит 512 дискретных отсчетов, характеризующих распределение интенсивности света во входном оптическом сигнале. Конструктивно ФПУ состоит из фотодиодной линейки, установленной на полупроводниковые термоохладители, и датчика температуры в виде термосопротивления, встроенного в металлическую прокладку между этой линейкой и термоохладителями. ФПУ выполнен в виде самостоятельного модуля, который крепится к разделительной стенке корпуса ОЭ-датчика. Электронные устройства (БУ, АЦП, БЗУ, БПС, ТС и БАО) располагаются в герметизированном корпусе с металлическими теплоотводами. Коммутация плат между собой осуществляется с помощью кросс-платы.

Созданный для решения практических задач действующий образец оптико-электронной аппаратуры автоматизированного контроля параметров пламени в отличие от экспериментального стенда, используемого в спектроскопических исследованиях, не обладает в полной мере его возможностями по разрешающей способности, энергетической чувствительности, быстродействию и т. п. Поэтому оценка работоспособности данного образца в первую очередь заключается в учете влияния конечной ширины спектра на изменение соотношений зарегистрированных при тех же температурах спектральных компонент. Кроме того, важным фактором получения достоверных результатов является цифровая обработка данных, предназначенная для устранения влияния неоднородности и нестабильности элементов ФПУ, а также для реализации внутри- и межкадровых алгоритмов обнаружения факелов. Отсюда возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований созданного образца в режиме автоматизированного контроля параметров газового пламени при условиях, аналогичных спектроскопическим исследованиям.

Таким образом, для сжигания газовой смеси использовалась та же пропановоздушная модельная горелка, что и в предыдущих экспериментах. Регистрация излучения осуществлялась навстречу факелу под углом $\sim 20^\circ$ относительно его оси при фокусировке на сопло горелки. Измерение пространственного распределения (профиля) интенсивности излучения пламени выполнялось в трех спектральных диапазонах — синем, зеленом и инфракрасном — при максимальной температуре факела 1000, 1200 и 1300 °С. Выбор спектральных диапазонов осуществлен на основе анализа результатов, полученных при спектроскопическом исследовании пламени. Синий диапазон (350—460 нм) охватывал излучение радикалов СН и частично одной группы радикалов С₂, зеленый (500—580 нм) — двух групп С₂ и инфракрасный (970—1100 нм) — фоновое излучение (данные приведены по полуспаду кривых пропускания).

Цифровая обработка включала в себя низкочастотную пространственную фильтрацию для устранения влияния аддитивного и мультипликативного высокочастотного шума, а также определение максимальных и интегральных (по заданной области) значений профилей, нормировку различных спектральных компонент и логические операции для формирования системы признаков и

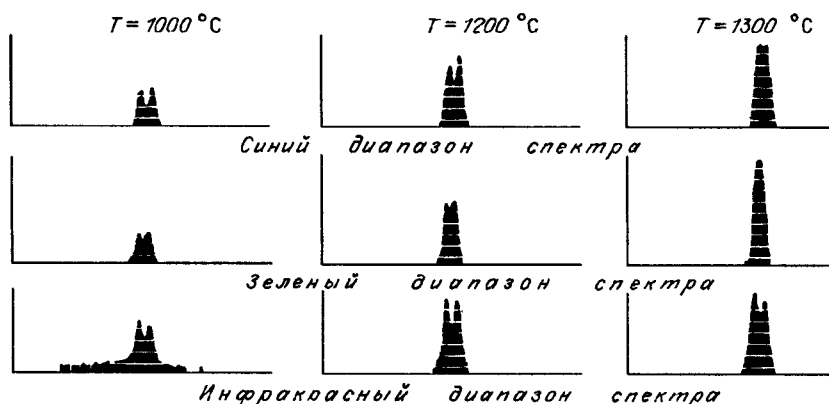


Рис. 7. Распределения интенсивности излучения факела в различных спектральных диапазонах

решающего правила. При этом с целью уменьшения потери разрешения полученных изображений (профилей) предложено использовать медианную [5] и медианную сигма-фильтрацию. Их суть заключается в ранжировании отсчетов окрестности каждой точки профиля и последующем выборе центрального (по местоположению) значения полученной последовательности. Причем в первом случае учитываются все отсчеты окрестности заданного размера, а во втором — лишь те из них, что отличаются от преобразуемой точки профиля не более чем на определенное значение. Однако если таких пикселей меньше заранее заданной величины, то обработка осуществляется по всей окрестности. Отметим, что параметры локальных операторов, включая размер окрестности, задаются исходя из характеристик шума.

Экспериментальные данные, полученные в заданных спектральных диапазонах при указанных температурах, предварительно усреднялись по нескольким реализациям, а затем подвергались медианной фильтрации с размером ядра 7 пикселей. Одномерные пространственные распределения интенсивности через центр сопла представлены на рис. 7. Операция сглаживания позволила устранить высокочастотный шум, обусловленный нестабильностью темновых токов элементов ФПУ. Видно также, что на конфигурацию изображений пламени существенное влияние оказывают стенки сопла, особенно при понижении температуры. С нашей точки зрения этот факт может быть эффективно использован при структурном (синтаксическом) анализе профилей факелов.

Определение изменения интенсивности в каждом спектральном диапазоне от температуры выполнялось с помощью интегрирования пространственного распределения пламени по области, проективно сопряженной с соплом горелки. Результирующие величины нормировались так же, как и при спектроскопических исследованиях, на соответствующие интегральные значения, полученные при температуре факела 1000 °С. Эти данные приведены в табл. 2 с учетом среднеквадратической погрешности. Видно, что при увеличении температуры пламени растет интенсивность всех спектральных компонент, причем фоновая компонента существенно медленнее коротковолновых. Это хорошо согласуется с предыдущими результатами (см. табл. 1) и указывает на высокое качество созданной аппаратуры. Однако сравнение данных, приведенных в таблицах, показывает, что интегральные (по спектру) значения имеют больший динамический диапазон, чем собственно значения интенсивности линий излучения пламени. Видимо, такой факт является следствием более быстрых изменений от температуры интенсивности периферии

Таблица 2

Т, °С	Диапазон		
	синий	зеленый	красный
1000	1	1	1
1200	1,88 ± 0,05	1,94 ± 0,05	1,33 ± 0,07
1300	2,33 ± 0,02	2,65 ± 0,08	1,51 ± 0,10

Т а б л и ц а 3

T, °C	Диапазон		
	синий/красный	зеленый/красный	синий/зеленый
1000	0,62 ± 0,01	0,51 ± 0,01	1,20 ± 0,02
1200	0,87 ± 0,02	0,75 ± 0,02	1,16 ± 0,02
1300	0,95 ± 0,05	0,90 ± 0,02	1,06 ± 0,02

основных линий. Для оценки относительного изменения излучения в синей и зеленой областях спектра информативные сигналы, соответствующие этим областям, нормировались на фоновые (для данной температуры) сигналы. Они представлены в табл. 3. Данные в правом столбце соответствуют отношению сигналов синего и зеленого диапазонов при изменении температуры пламени. Из таблицы видно, что при выходе на стабильный режим горения (1300 °C) интенсивность излучения в более коротковолновом (синем) диапазоне первоначально растет быстрее, чем в зеленом, а затем этот эффект практически компенсируется. Поэтому полученные данные могут быть использованы не только для определения наличия или отсутствия пламени, но также и для оптимизации процесса горения.

Таким образом, в работе:

— показано, что регистрация излучения под небольшим углом навстречу факелу (~10—20°) дает наиболее надежную информацию о режимах горения;

— определены наиболее стабильные диапазоны в видимой и ИК-областях спектра излучения пламени (431—438, 467—472, 513—517, 559—564, ~591, 616—625, 700—1100 нм);

— в качестве информативных выбраны спектральные линии с наибольшей зависимостью интенсивности излучения пламени от изменения температуры (431,5; 467; 516,5 нм);

— определен динамический диапазон этого изменения (> 100) в рабочей области температур вплоть до погасания пламени;

— экспериментально установлен характер изменения температуры в отсутствие неравновесного излучения пламени и для конкретного состава газовой смеси определен порог ее лавинообразного нарастания (~260 °C).

На этой основе:

— предложен дистанционный метод селективного контроля параметров пламени газообразных углеводородов, сочетающий регистрацию информативных и опорных пространственно распределенных (преимущественно по одной координате) оптических сигналов в нескольких фиксированных спектральных диапазонах с электронной обработкой полученных данных;

— разработан и создан действующий образец оптико-электронной контрольно-измерительной системы с датчиком на основе многоэлементного линейного фотоприемника.

В результате экспериментальных исследований показана высокая эффективность, надежность и быстродействие автоматизированного селективного контроля параметров газового пламени не только в стационарном режиме горения, но и, что более существенно, в переходных режимах воспламенения и погасания.

Полученные результаты дают основания для продолжения исследований в плане применения методов пассивной оптической спектроскопии с целью измерения температуры пламени и последующей оптимизации процесса горения газовой смеси, а также для разработки и создания серийной контрольно-измерительной аппаратуры селективного контроля параметров пламени газообразных углеводородов.

В заключение авторы выражают свою признательность А. Н. Опарину и В. А. Григорьеву за помощь в работе и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порев В. А., Бойко И. В., Хлыстов В. Г. Прибор для дистанционного контроля температурных полей // Дефектоскопия. 1991. № 3.
2. Philipp H., Fuchs H., Winklhofer E., Pretzler G. Flame diagnostics by light sheet imaging and by shearing interferometry // Opt. Eng. 1993. 32, N 5.
3. Козлов В. Г., Брагин В. Б., Узбеков Ф. К. и др. Опыт проведения пусконаладочных работ на головном котле ТПП-804 при сжигании природного газа // Электрические станции. 1988. № 6.
4. Гейдон А. Спектроскопия пламен. М.: ИЛ, 1959.
5. Кронрод М. А., Чочиа П. А. Фильтрация помех на изображении с использованием медианы распределения // Иконика. Теория и методы обработки изображений. М.: Наука, 1983.

Поступила в редакцию 6 февраля 1995 г.
