

УДК 681.785.55: 543.423.1

СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАМЕНИ*

Борзов С.М., Зарубин И.А., Козик В.И., Лабусов В.А.
Институт автоматизирующей и электротехники СО РАН,
Новосибирск

Одним из объективных источников информации о процессах, происходящих в топочной зоне котлоагрегатов при сжигании органических топлив, является спектральный состав излучения пламени. Известно, что возникающее свечение имеет две составляющие. Первая обусловлена излучением возбужденных продуктов горения (хемиллюминесценция). Ее спектр состоит из отдельных линий и полос. При этом линейчатый спектр связан с испусканием света свободными атомами, и каждая линия обусловлена переходом электрона из одного стационарного состояния в другое, а полосатые спектры соответствуют электронным переходам в молекулах. Вторая составляющая излучения характеризуется непрерывным спектром (тепловое излучение). Она большей частью обусловлена свечением частиц веществ, находящихся в твердой или жидкой фазах. При этом наиболее важным является непрерывный спектр горячих частиц углерода (сажи). Его спектральный состав соответствует закону Планка для излучения черного тела. Интенсивность обоих составляющих определяется режимами горения топлива.

Для изучения спектральных свойств излучения пламени в лабораторных и промышленных условиях в ИАиЭ СО РАН разработан портативный многоканальный спектрометр «Колибри-2». Прибор создан на базе спектрометра «Колибри» [1] по оптической схеме Черни-Тернера [2], с использованием в качестве диспергирующего элемента плоской дифракционной решетки и в качестве приемника излучения линейки фотодиодов. В процессе работы спектрометра «Колибри» были выявлены некоторые его недостатки. Во-первых, его рабочий спектральный диапазон не давал возможность регистрации линий всех требуемых элементов. Во-вторых, он имел не достаточные пределы обнаружения элементов ограниченные высоким уровнем рассеянного света из-за попадания нулевого порядка на поверхность дифракционной решетки, который раскладывался в «паразитный» спектр, фокусируемый выходным зеркалом на поверхности линейки фотодиодов. Уровень рассеянного света увеличивало также защитное стекло корпуса линейки из-за многократного переотражения излучения как внутри стекла, так и между стеклом и кристаллом линейки.

Оптическая схема и конструкция спектрометра «Колибри-2» оптимизированы для получения спектра высокого качества с низким уровнем фонового излучения в любой из областей, лежащих в спектральном интервале 190-1100 нм. Выбор рабочей области осуществляется путём смены и поворота дифракционных решеток. Герметичный корпус спектрометра наполнен инертным газом. Излучение вводится в спектрометр с помощью кварцевого конденсора или волоконно-оптического кабеля.

* Работа выполнена при поддержке Президиума РАН, Сибирского отделения РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 24).

Оптическая схема спектрометра должна обладать минимальными aberrациями для получения наименьшей ширины и наибольшей интенсивности спектральных линий. При построении спектрометра по горизонтальной оптической схеме Черни-Тернера из составляющих aberrаций в направлении дисперсии наибольшую роль играет кома. Для ее компенсации должно выполняться условие [1]:

$$\alpha_2 = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos^3 \varphi'} \alpha_1, \quad (1)$$

где α_1 и α_2 – углы между падающими и отраженными от зеркал главными лучами; φ – угол падения на дифракционную решетку, φ' – угол дифракции для лучей, фокусируемых в центре линейки фотодиодов. С помощью формулы (1) и программы расчёта оптических систем Zemax [3] было показано, что минимальными aberrациями обладают два варианта схемы с «+1» и «-1» рабочими порядками дифракции (рис.1), которые работают следующим образом. Прошедший входную щель световой пучок поступает на входное (коллимирующее) вогнутое зеркало с $R = 200$ мм. Последнее преобразует его в параллельный пучок света, освещающий плоскую дифракционную решетку. В зависимости от длины волны отраженные световые пучки имеют разные углы наклона по отношению к нормали решетки. Выходное (фокусирующее) вогнутое зеркало с $R=200$ мм создает на поверхности фоточувствительной области линейки фотодиодов монохроматические изображения входной щели, совокупность которых и образует спектр. Для оптической схемы с «-1» рабочим порядком, длина волны начала спектрального диапазона λ_{\min} фокусируется на фотодиодах, ближайших к дифракционной решетке, середины диапазона λ_{cp} – в центре линейки, а конца диапазона λ_{\max} – на дальнем от решётки конце линейки. Для варианта с «+1» рабочим порядком наблюдается обратная ситуация – длина волны конца спектрального диапазона регистрируется фотодиодами, ближайшими к дифракционной решетке, длина волны начала диапазона фокусируется на наиболее удаленных от решетки фотодиодах. Можно заметить, что детектор, обладающий большими габаритными размерами (например, электронно-оптический преобразователь ЭОП), легче разместить в схеме с «+1» рабочим порядком.

На рис.2 показаны графики доли дошедшей до фоточувствительной области линейки (высота 1 мм, длина 32 мм) энергии в зависимости от длины волны излучения для «+1» и «-1» рабочих порядков дифракции, полученные расчётным путём. При этом высота входной щели составляла 2 мм, ширина 15 мкм, а также предполагалось, что дифракционная решетка с $N = 320$ штр/мм имеет коэффициент отражения равным единицы во всем диапазоне длин волн. Из графиков видно, что в коротковолновой области спектра поверхности фотодиодов достигает существенно больше энергии в «-1» рабочем порядке, в то время, как в длинноволновой на поверхность фотодиодов падает больше энергии в схеме с «+1» рабочим порядком. Ввиду того, что в большинстве задач интенсивность излучения в коротковолновой области существенно ниже, чем в длинноволновой, в качестве базовой схемы спектрометра «Колибри-2» была выбрана оптическая схема с «-1» рабочим порядком. Однако в этой оптической схеме при угле падения на дифракционную решетку $\varphi = 7,60 \div 10,80$ и выполнении условия (1) часть нулевого порядка, попадая на выходное зеркало, возвращается на дифрак-

ционную решетку, и далее, раскладываясь в «паразитный» спектр, увеличивает уровень фона в спектрометре. Для устранения этого эффекта угол α_2 , оптимальные значения которого для $\varphi = 7,60 \div 10,80$ равны $22,030 \div 19,80$, соответственно, был увеличен до $26,80$. Такое увеличение угла α_2 не оказало существенного влияния на спектральное разрешение прибора, но направило нулевой порядок в промежуток между линейкой фотодиодов и дифракционной решеткой.

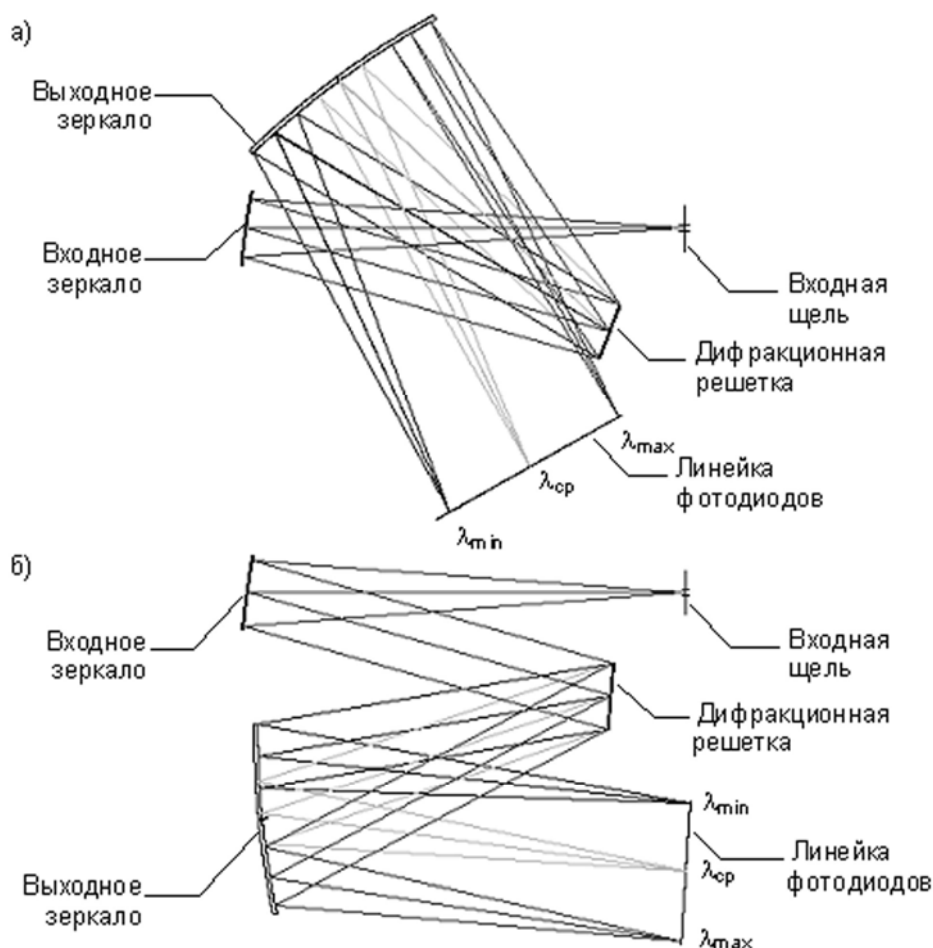


Рис. 1. Варианты горизонтальной оптической схемы Черни-Тернера с различными рабочими порядками дифракционной решётки: а) «+1» порядок; б) «-1» порядок

Выбор рабочего спектрального интервала спектрометра возможен в области 190-1100 нм, коротковолновая граница которой определяется поглощением излучения воздухом, а длинноволновая – краем спектральной чувствительности линейки фотодиодов.

Конструкция спектрометра выполнена следующим образом. Его герметичный корпус наполнен инертным газом с избыточным давлением для увеличения срока службы. Обеспечена возможность установки дифракционной решетки под нужным углом для выбора рабочего спектрального интервала. Линейка фотодиодов используется в безкорпусном исполнении. В этом случае отсутствует паразитное излучение, возникающее в результате переотражения от покровного стекла, что позволяет снизить уровень фона в зарегистрированном спектре. Ста-

билизация температуры линейки осуществляется с помощью двухкаскадного термоэлектрического модуля Пельтье и цифрового датчика температуры, находящегося в тепловом контакте с кристаллом линейки. Фоточувствительная поверхность линейки устанавливается в область наилучшей фокусировки спектра с помощью специальных винтов. Входная щель шириной 7, 15 или 25 мкм выполнена методом фотолитографии на слое алюминия, нанесённом на поверхность сапфировой подложки. Для автоматической калибровки за входной щелью размещен электромеханический затвор, перекрывающий доступ излучения в спектрометр. На входе спектрометра установлена линза для фокусировки анализируемого излучения на входной щели. Спектрометр «Колибри-2» имеет следующие технические характеристики: рабочий спектральный диапазон – 190-1100 нм; обратная линейная дисперсия – 0,19 нм/диод; фокусное расстояние – 100 мм; относительное отверстие – 1:6; количество фотодиодов – 2580; размер фотодиода – $12,5 \times 1000$ мкм²; минимальное время экспозиции – 10 мс; максимальное время экспозиции – не ограничено; габариты – $150 \times 200 \times 80$ мм³; вес – 3 кг.

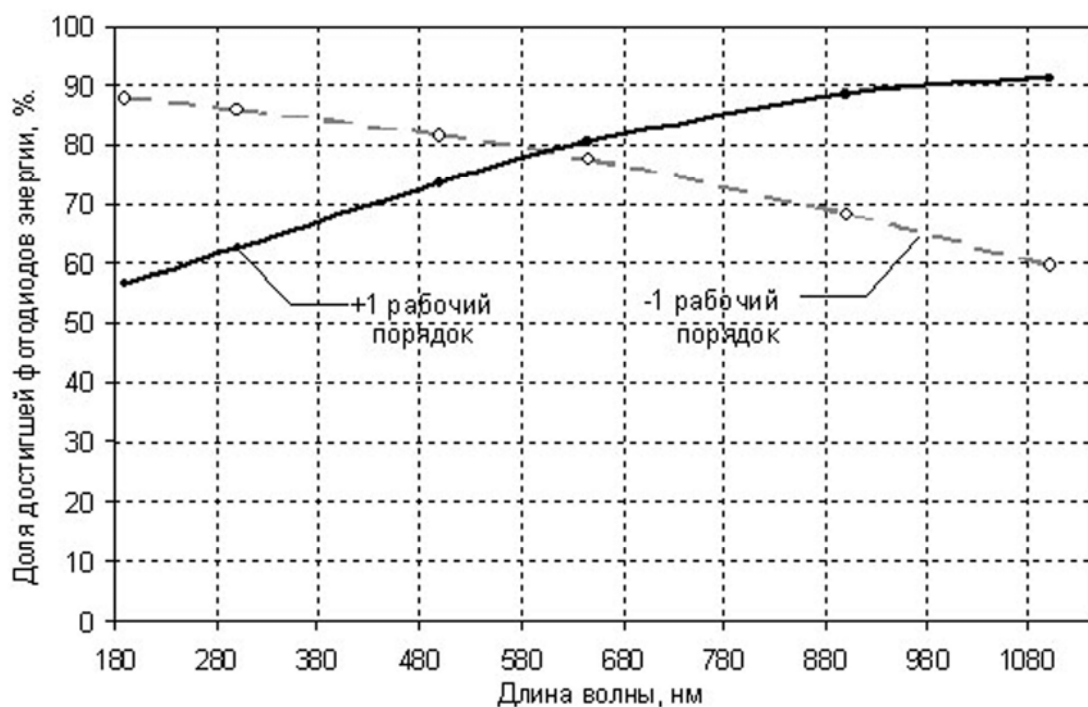


Рис. 2. Зависимость доли достигшей фоточувствительной поверхности линейки энергии от длины волны для вариантов схемы с «+1» и «-1» рабочими порядками

На рис.3 приведены графики зависимости ширины спектральных линий от длины волны (ширина входной щели – 15 мкм), характеризующие предел спектрального разрешения спектрометра, полученные расчётным путём и экспериментально. Незначительное увеличение ширины линий, полученных экспериментально, в сравнении с расчётными (~1/4 шага расположения фотодиодов) связано с влиянием дискретности линейки фотодиодов. Справа приведена шкала для пространственных размеров спектральных линий.

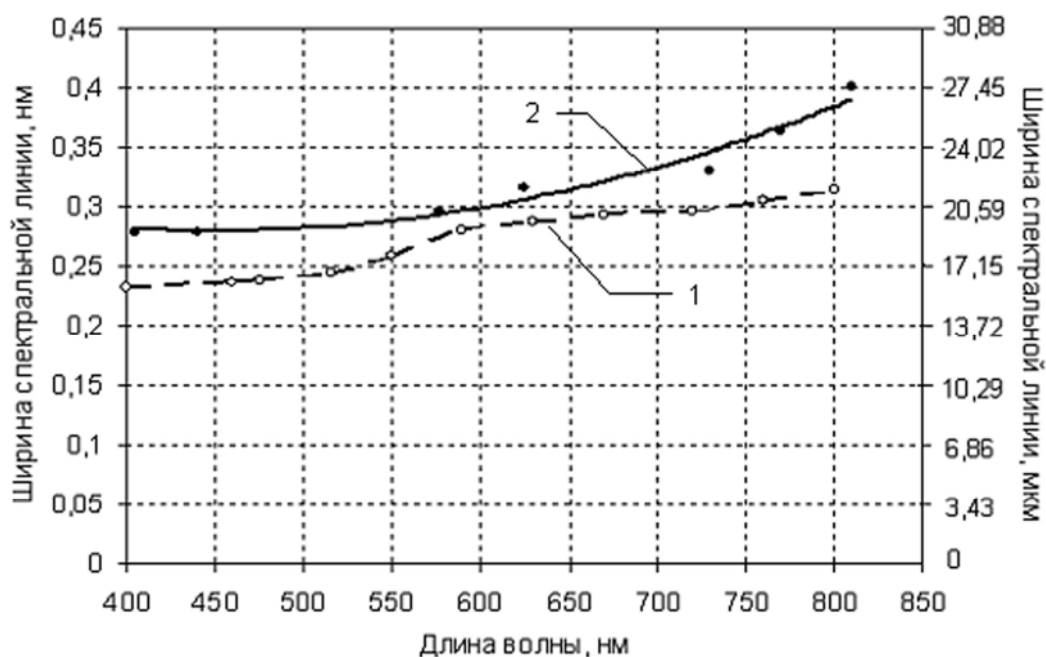


Рис. 3. Ширина спектральных линий на полувысоте в зависимости от длины волны:
1 – расчётная, 2 –экспериментальная

С использованием разработанного прибора на испытательном стенде ИТ СО РАН проведены предварительные исследования трансформации оптических свойств пламени на различных стадиях горения твердого топлива. На рис.4 показано семейство спектров, полученных в процессе розжига (амплитуда сигнала увеличивается по мере прогрева топочного пространства). Здесь линии излучения радикалов C_2 и CH , характерные для пламени предварительно перемешанного газового топлива, не наблюдаются. В то же время, наличие горизонтального участка на графиках, равно как и оценки по температуре пламени говорят о том, что полученные спектры не являются спектрами равновесного излучения сажи. Вероятнее всего мы наблюдаем спектр излучения, возникшего в результате диффузионного горения легких фракций (обусловленный свечением молекул воды), а отдельные полосы в районе 590 и 770 нм, по-видимому, связаны с излучением захваченных потоком молекул окисла железа с поверхностей нагретых элементов горелок.

Для подтверждения сделанных выводов рассмотрим спектры излучения трех разных областей газового факела (расположенных на различных расстояниях от среза горелки), полученные при исследованиях пламени модельного горелочного устройства на лабораторном стенде (рис. 5). Первая область соответствует внутренней реакционной зоне факела, вторая – центральной его части, третья – внешней зоне горения. Видно, что по спектральному составу излучение угольного пламени близко к излучению внешней зоны газового факела, где имеет место диффузионный процесс горения. В реальной ситуации при визировании по оси горелки в поле зрения датчика попадает как ядро факела, так и его внешняя зона, а также, при наличии встречной горелки, и ее факел (главным образом его внешняя зона). На рис.6 приведен типичный спектр излучения газового факела, полученный на промышленном котлоагрегате при визировании по оси горелки, из которого видна роль излучения внешней зоны факела.

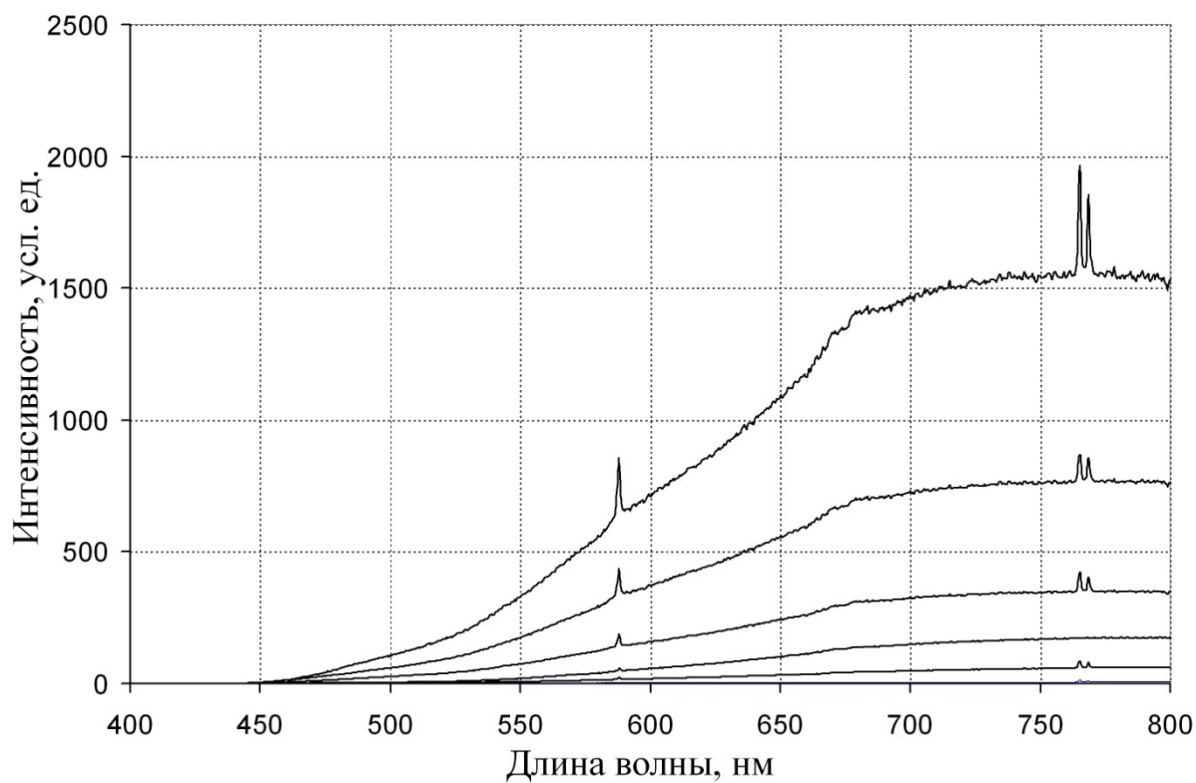


Рис. 4. Спектры излучения твердого топлива на различных стадиях розжига

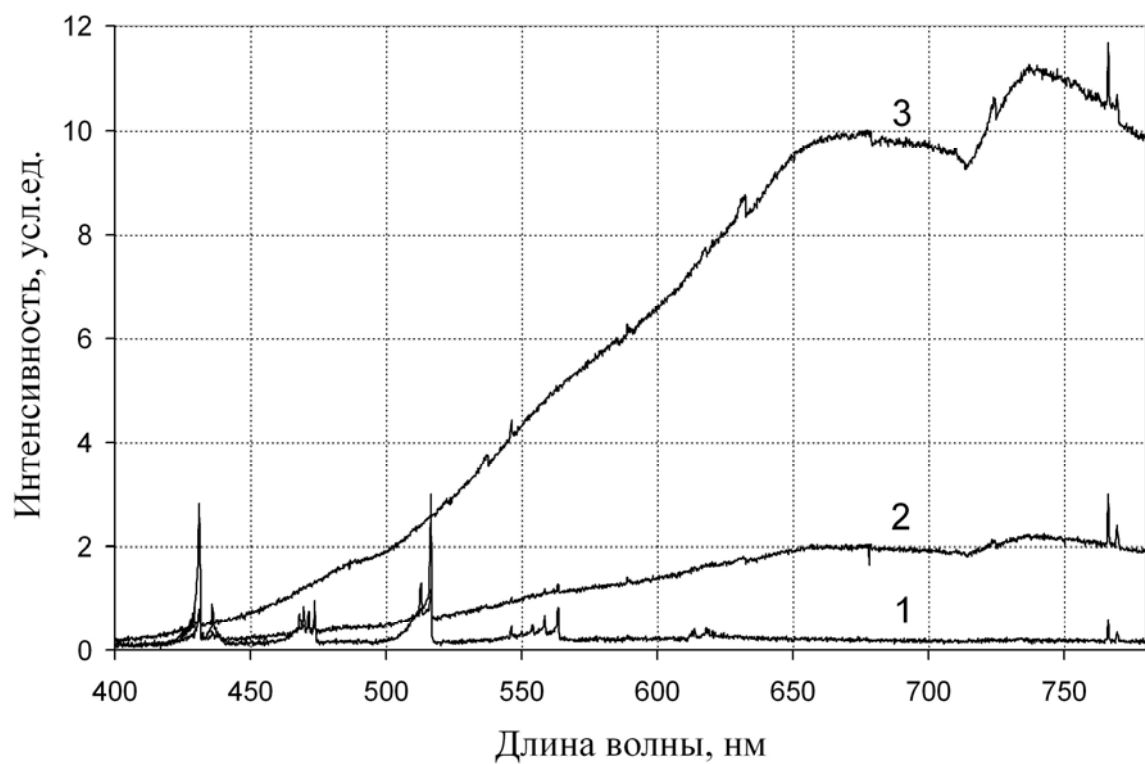


Рис. 5. Спектры излучения трех разных областей газового факела

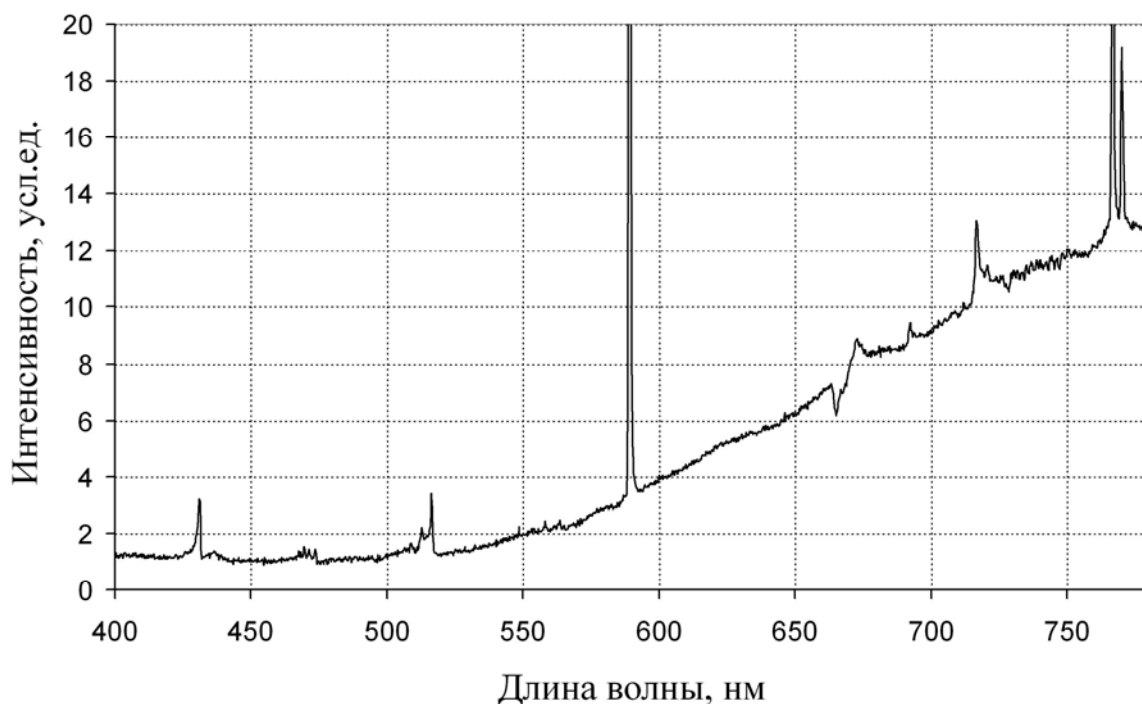


Рис. 6. Спектр излучения газового факела на промышленном котлоагрегате при визировании по оси горелки

Таким образом, путем оптимизации оптической схемы и изменения конструкции повышена чувствительность спектрометра, уменьшен уровень фона вблизи спектральных линий, а также увеличен срок его службы. Созданный спектрометр «Колибри-2» использовался при анализе спектров излучения газового топлива. Проведены предварительные исследования оптических свойств излучения пламени твердого топлива. Показано, что по спектральному составу излучение пламени твердого топлива близко к излучению внешней диффузионной зоны газового факела.

Литература

1. Лабусов В.А., Путьмаков А.Н., Саушкин М.С., Зарубин И.А., Селюнин Д.О. Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 5. С. 35-39
2. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: «Машиностроение», 1975. – 312 с.
3. Rimmer M. / Proc. of SPIE, vol. 665, 1986, pp. 99