

УДК 654.949

В. Д. Анцыгин, С. М. Борзов, О. И. Потатуркин, Н. Н. Шушков

(Новосибирск)

**ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
УГЛЕВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ**

Представлены экспериментальные результаты трансформации спектральных свойств пламени углеводородовоздушных смесей при атмосферном давлении в зависимости от режима горения. Показано, что излучение промежуточных радикалов в узких линиях спектра несет информацию о горении основного углеводорода, а фоновая составляющая — о горении более тяжелых углеводородов.

Процессы горения углеводородов в нормальных атмосферных условиях вызывают все больший интерес в связи с повышением экологических требований к теплоэнергетическим установкам. Как известно, газообразное углеводородное топливо наиболее «экологически чистое», поскольку основными продуктами сгорания являются углекислый газ и вода. Однако при недостатке воздуха и соответственно неполном сгорании углеводородов в теплоагрегатах образуются токсичные выбросы, основу которых составляет оксид углерода (СО). Кроме того, сжигание газообразных углеводородов при избытке воздуха часто сопровождается значительным количеством оксида азота (NO), который в атмосфере быстро окисляется до NO₂.

Таким образом, оптимизация процесса сжигания газообразных углеводородов необходима не только для повышения эффективности функционирования энергетических установок, но и для уменьшения экологического ущерба от их деятельности, устранения аварийных выбросов токсических веществ в опасных концентрациях. Оптимизацию интегральных характеристик режима работы теплоагрегатов в первую очередь можно осуществлять, используя оперативную информацию о составе топлива и выходных газов. Разработка дистанционного метода селективного контроля параметров газового пламени на принципах пассивной оптической спектроскопии и создание соответствующей оптико-электронной аппаратуры [1] дают возможность дополнительно рассмотреть вопрос об оптимизации процесса сжигания топлива в каждой отдельной горелке теплоагрегата.

Цель данной работы — исследование трансформации спектральных свойств пламени в зависимости от режима горения при атмосферном давлении и анализ возможности использования этой информации для оптимизации процесса сжигания газообразных углеводородов.

Известно [2], что в видимом диапазоне свечение пламени обусловлено в основном излучением радикалов СН (430—438 нм), С₂ (группа полос 467—472, 513—517, 547—564 нм) и молекул Н₂О (591, 616—625 нм). Абсолютная и относительная интенсивность этих полос в спектре излучения существенно зависит от состава газовой смеси, который, в свою очередь, определяет режим горения.

Целесообразно характеризовать такой состав параметром α , представляющим собой отношение содержания воздуха в данной смеси к его содержанию в смеси стехиометрического состава, когда происходит полное сгорание угле-

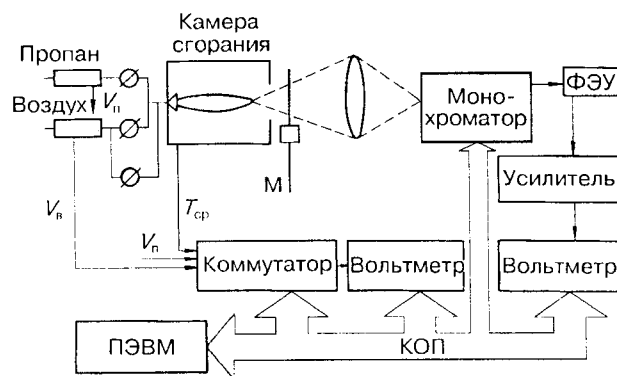


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для спектральных измерений излучения пламени

водорода с образованием H_2O и CO_2 . Таким образом, $\alpha = 1,0$ соответствует стехиометрическому составу, а $\alpha = 0,5$ (2,0) — богатой смеси с половинным (бедной смеси с удвоенным) содержанием кислорода или воздуха.

Для проведения исследований трансформации спектральных свойств пламени углеводородовоздушных смесей при атмосферном давлении в зависимости от режимов горения создана экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. В качестве топлива использовалась пропановоздушная смесь, поскольку пропан является типичным и наиболее доступным газообразным углеводородным топливом.

Установка позволила выполнять спектральные измерения излучения пламени в интервале 200—1000 нм с разрешением 0,1 нм как в автономном режиме, так и в режиме управления от ПЭВМ. Состав пропановоздушной смеси устанавливался с помощью натекателей и контролировался расходомерами, которые выдавали сигналы, пропорциональные расходу пропана (V_n) и воздуха (V_n). Эти сигналы, а также сигнал $T_{ср}$, пропорциональный средней температуре в камере сгорания, поступали через коммутационное устройство на вход вольтметра и в цифровом виде с его выхода через канал общего пользования (КОП) регистрировались в ЗУ ПЭВМ.

Излучение факела горелки проецировалось на входную щель монохроматора. С целью повышения помехоустойчивости и устранения фоновых паразитных засветок, а также для снижения влияния пространственных флуктуаций факела применялась модуляция светового потока на выходе камеры сгорания (М), усиление и выпрямление переменного сигнала ФЭУ на частоте модуляции 350 Гц и усреднение результирующего сигнала с помощью селективного нановольтметра. Распределение интенсивности излучения факела по длинам волн также регистрировалось в ЗУ ПЭВМ. Управление коммутационным устройством, разверткой монохроматора и измерительными приборами выполнялось по специально разработанной программе через КОП.

Для получения истинных спектров излучения пламени осуществлялась их нормировка на спектральную аппаратную функцию измерительной системы. Последняя определялась с помощью калибровочной лампы с паспортизованным спектром излучения, которая при калибровке помещалась в измерительную систему вместо факела горелки.

С целью определения влияния состава газовой смеси на характер свечения пламени измерялась его интенсивность в различных спектральных диапазонах при фиксированном расходе пропана и изменении расхода воздуха. Типичные результаты этих измерений представлены на рис. 2, а—с. Наблюдается максимум излучения вблизи $\alpha = 0,3$, спад и последующее незначительное увеличение светимости при $\alpha > 0,5$ в полосах спектра, соответствующих излучению радикалов CH , C_2 . В диапазоне же, соответствующем излучению молекул H_2O , при $\alpha > 0,5$ светимость практически постоянна. Для изучения этого эф-

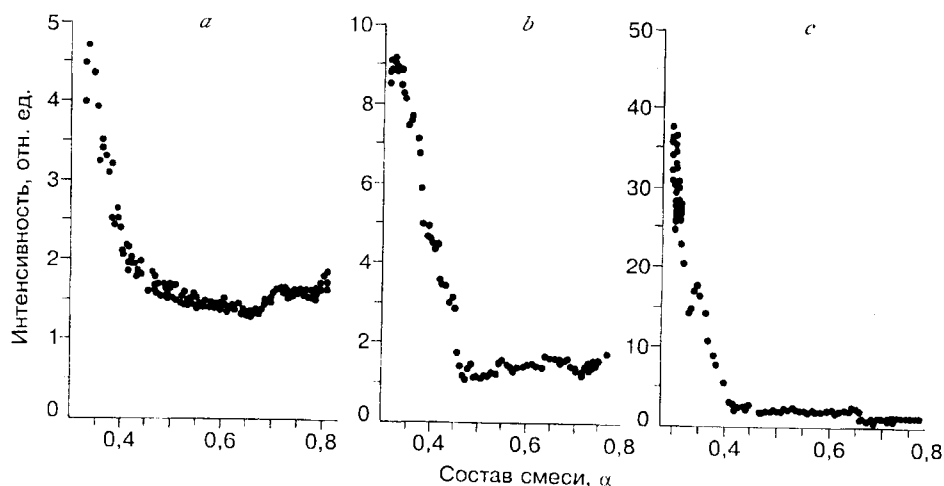


Рис. 2. Интенсивность свечения пламени в зависимости от состава газовой смеси в различных спектральных диапазонах:
a — 430—438; *b* — 513—517; *c* — 616—625 нм

факта выполнены измерения спектров излучения пламени при различных значениях α . Полученные данные показывают значительную трансформацию вида спектра в зависимости от соотношения воздух/пропан. Типичные спектры излучения при разных α представлены на рис. 3.

Анализ зависимости спектров от содержания воздуха в газовой смеси показывает, что при значениях $\alpha < 0,4$ наблюдается сплошной спектр излучения с небольшой примесью свечения радикалов (рис. 3, *a*). В этом режиме процесс горения сопровождается значительным выделением частиц сажи в выходных газах, поэтому наблюдаемое свечение пламени обусловлено в основном раскаленными частичками углерода, которые излучают практически как черное тело. Это подтверждается расчетами по формуле Планка (штриховая кривая на рис. 3, *a* соответствует излучению черного тела при температуре 1700 К). В отличие от спектра в области максимума (по α) спектр свечения пламени для $\alpha = 0,7$, представленный на рис. 3, *b*, в большей степени определяется излучением радикалов CN и C_2 , чем равновесным излучением.

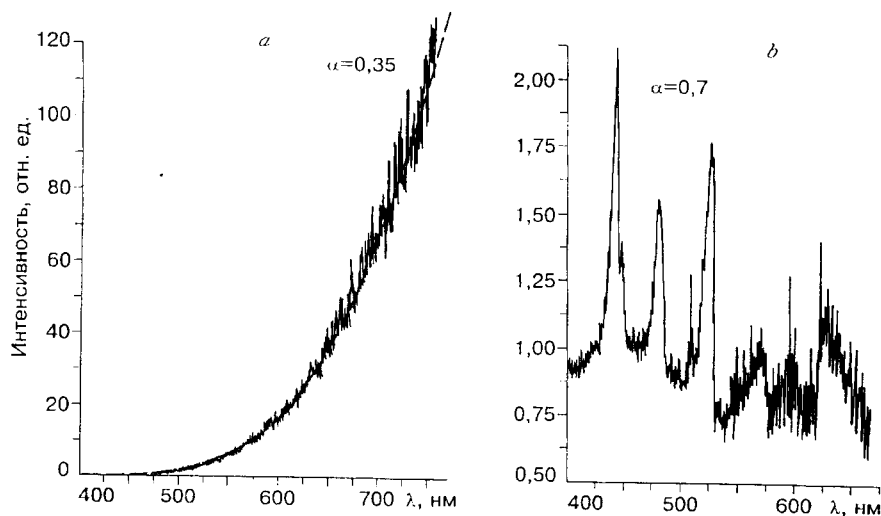


Рис. 3. Спектры излучения пропановоздушного пламени при различных значениях состава газовой смеси

Из рис. 2 и 3 видно, что процесс сажеобразования наиболее эффективен при значениях $\alpha = 0,3-0,4$ и резко уменьшается при повышении содержания воздуха. Отметим, что относительная величина и форма максимума существенно зависят от конструкции горелки и степени предварительного перемешивания смеси.

Для выделения излучения радикалов СН и С_2 выполнялось вычитание фоновой подставки, определяемой вблизи каждой из перечисленных спектральных линий. Полученные таким образом типичные зависимости излучения этих радикалов от состава смеси воздух/пропан при атмосферном давлении показаны на рис. 4. Видно, что при $\alpha > 0,5$ наблюдается рост светимости в области излучения радикалов С_2 и СН . Таким образом, исследование трансформации спектра излучения пламени при сжигании однородного газового топлива в лабораторных условиях показало, что интенсивность излучения пламени в линиях радикалов однозначно связана с соотношением воздух/газ и соответственно несет информацию об эффективности горения.

Следует отметить, что в проведенных экспериментах использовалась обычная горелка Меккера. Ее конструкция не позволила достичь значения $\alpha = 1$. Увеличение количества воздуха в смеси приводило к остыванию сопла горелки и соответственно срыву пламени. В промышленных теплоагрегатах горение происходит в замкнутом объеме при постоянном разогреве газа от общего пламени котла. Это даст возможность сжигать топливо при α , равной или большей единицы.

На практике задача оптимизации процесса горения существенно усложняется наличием в топливной смеси различных углеводородов и конденсата. Рассмотрим для примера горение смеси, содержащей 10 % метана, 0,1 % пропана и 89,9 % воздуха. Условия горения такой смеси близки к оптимальным для метана ($\alpha = 1$ соответствует соотношению воздух/газ, равное 9,5). Однако горение пропана в этом случае происходит при существенном недостатке воздуха, поскольку для его полного сгорания необходима смесь с соотношением воздух/газ, равным 23,8. Отсюда α для пропана $\sim 0,4$, что соответствует условию максимального сажеобразования (см. рис. 2). Поскольку полная светимость при таком значении α существенно превосходит светимость, обусловленную промежуточными радикалами горения, очевидно, что именно свечение раскаленных частичек сажи, образованных при горении пропана, вносит основной вклад. Увеличение (уменьшение) количества воздуха в смеси приводит к росту (снижению) светимости радикалов, а также к существ-

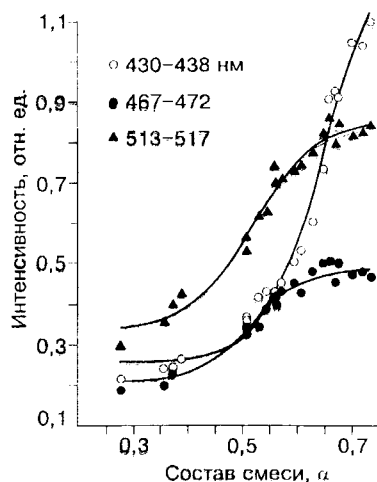


Рис. 4. Интенсивность излучения радикалов СН (430—438 нм) и С_2 (467—472, 513—517 нм) в зависимости от состава газовой смеси

венному снижению (росту) количества образующейся сажи и, как следствие, интенсивности фоновой составляющей.

Следовательно, контроль режимов горения целесообразно осуществлять на основе совместной регистрации интенсивности узких линий спектра в областях излучения радикалов CH , C_2 и их окрестностей. Причем, варьируя местоположение и ширину таких линий и используя полученную информацию для дальнейшей цифровой обработки, можно адаптировать процедуру оптимизации процесса горения к составу газового топлива. В этом случае необходима довольно качественная спектральная аппаратура с точным выделением требуемых линий излучения и возможностью их перестройки.

Другой способ контроля режимов горения заключается в использовании интегральной информации о светимости пламени в относительно широких областях спектра. Действительно, при постоянном составе топлива изменение фоновой составляющей опосредованно несет информацию об изменении соотношения воздух/газ в топливной смеси и соответственно о качестве сжигания топлива. Этот метод был реализован в разработанной и установленной на ПР ТЭЦ Уренгойской ГРЭС оптико-электронной системе селективного контроля параметров пламени [3].

Таким образом, показано, что разложение спектра пламени на составляющие и их регистрация позволяют получить информацию о горении основного углеводорода по свечению радикалов, а более тяжелых углеводородов — по фоновому излучению. Предложено оптимизировать процесс сжигания газового топлива на основе совместной регистрации узких спектральных линий непосредственно и в окрестности излучения радикалов CH и C_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анцыгин В. Д., Борзов С. М., Васьков С. Т. и др. Оптико-электронный метод и аппаратура контроля параметров пламени газообразных углеводородов // Автометрия. 1995. № 2. С. 3.
2. Гейдон А. Спектроскопия пламен. М.: ИЛ, 1959.
3. Анцыгин В. Д., Борзов С. М., Васьков С. Т. и др. Селективная дистанционная диагностика пламени газообразных углеводородов // Опт. журн. 1996. № 10. С. 77.

Поступила в редакцию 6 сентября 1997 г.