

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДИНАМИКИ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ
ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ**

УДК 621.181.662.9

**А. П. Бурдуков, Е. И. Карпенко, В. И. Попов,
В. Н. Разваляев, В. Д. Федосенко**

**Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск**

На основе лазерного нагрева предложена экспериментальная методика исследования динамики горения малых частиц топлив при автоматизированном измерении и обработке температурных и фотоэлектрических характеристик. На примере горения капли водоугольной суспензии показано, что методика позволяет изучить температурную и фотоэлектрическую динамику горения одиночной капли, фиксировать длительность температурных фаз горения, момент и температуру воспламенения капли, получать информацию о массовой скорости горения.

Проблема исследования горения водоугольных смесей вызвана технико-экономическими потребностями, экологией, необходимостью создания новых видов топлив. Водоугольные суспензии могут представлять большой интерес для объектов как «малой», так и «большой» энергетики. Они обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с традиционными топливами: появляется возможность создания композитных смесей (на базе углей с различными реакционными свойствами), снижается при горении выброс окислов азота, серы и т. п.

В работе предложена экспресс-методика исследования динамики горения малых частиц топлив на основе лазерного нагрева. Полученные таким образом данные, естественно, не в полной мере отражают динамику горения малых частиц в реальной топке, однако позволяют исследовать режимы горения, оценить влияние различных факторов (температуры, размера частицы и ее состава) на время полного выгорания. Существенным преимуществом данной методики является возможность автоматизации процесса, оперативность, детальное выделение по времени всех стадий процесса — прогрев капли, выход водяных паров, выход и горение летучих, горение коксового остатка.

Существуют различные способы нагрева (омический, плазменный, пламенный, искровой и т. п.) малых количеств горючих веществ до их воспламенения. Не вдаваясь подробно в их обсуждение, заметим, что ни один из них не позволяет в реальном масштабе времени достаточно просто (особенно в начальной стадии процесса) отследить динамику горения в широком диапазоне температур. Плазменный или искровой методы нагрева неудобны тем, что создают непосредственный контакт капли с инородной средой. Омический способ нагрева ограничен максимальной температурой (обычно до 1200 °С) и неудобен для исследования начальной стадии динамики горения, так как время введения капли в определенное (по температуре) место печи соизмеримо с временем первых стадий процесса — прогрев,

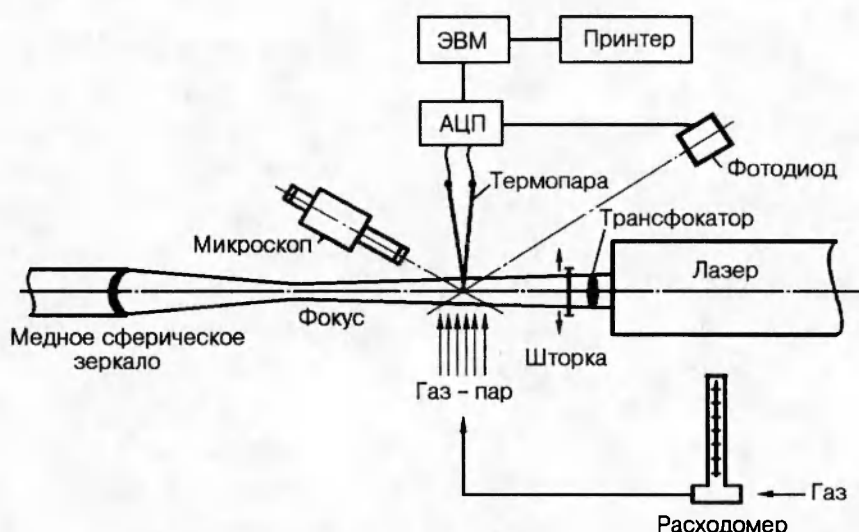


Рис. 1. Принципиальная схема процесса зажигания капель топлив

испарение влаги и выход летучих. В настоящем эксперименте нагрев неподвижной капли водоугольной суспензии начинается с момента открытия шторки затвора лазера. По сравнению с омическим лазерный способ нагрева позволяет проводить эксперимент при более высоких температурах.

В данной работе обсуждаются результаты экспериментального исследования динамики горения капель водоугольных суспензий в атмосфере воздуха. В опытах измерялись температура и интенсивность свечения капли в процессе горения. Изучено влияние диаметра капли и температуры на динамику горения. Определены время выгорания капли топлива, температура воспламенения, выявлена временная доля каждой фазы горения (прогрев капли, испарение воды водоугольной суспензии, горение летучих, коксового остатка).

Экспериментальная установка (рис. 1) включает в себя CO_2 -лазер ($\lambda \approx 10,6$ мкм, $N \approx 25$ Вт) с водяным охлаждением. Отъюстированный и частично диафрагмированный луч проходит через оптическую линзу, выполненную из BaF_2 , затем соосно (не взаимодействуя со стенкой) проходит через цилиндрическую кювету-реактор. На конце кюветы расположено медное сферическое зеркало, отражающее луч в противоположном направлении таким образом, чтобы количество падающей световой энергии на обе полусферы капли, подвешенной на спае термопары, было одинаково. Это, в свою очередь, достигается расчетным (по фокусному расстоянию) расположением спае термопары. Для уменьшения утечек тепла вдоль проводов термопары 2-миллиметровый участок вблизи спае располагался по оси луча. Термопара (Pt — Pt/10% Rh) изготовлена из проволоки диаметром 100 мкм. Диаметр спае не превышал 120 мкм. Исследования температурно-временной характеристики термопары (нагрев и охлаждение) показали, что ее постоянная времени меньше изучаемых временных фаз горения и составляет 0,25 с.

Термопара закрепляется на цапговом полусферическом шарнире, прилегающем к кювете-реактору таким образом, чтобы ее можно было легко сопрягать с лучом и юстировать. На другом, противоположном окне кюветы соосно с термопарой располагается фотодиод, работающий в видимой области спектра. Падающая на термопару мощность лазерного излучения может меняться в результате продольного перемещения (трансфокатор) оптической линзы, а также за счет допустимого изменения тока на высоковольтном

источнике питания лазера.

Процедура измерения температуры и интенсивности свечения капли в естественных (атмосферных) условиях горения состоит в следующем. Вначале луч от лазера перекрывался шторкой, которая открывалась автоматически электромагнитом по программе запуска. Затем через верхнее окно кюветы на спай термопары наносилась капля исследуемого топлива. Диаметр капли в кювете измерялся с помощью микроскопа. Нагрев капли начинался с того момента, когда сигнал с компьютера давал команду на открытие шторки затвора лазера. Луч нагревал каплю до температуры, определяемой условиями эксперимента. Доля поглощенной энергии определялась степенью черноты топлива, которая может меняться во время процесса. Кроме того, из-за присутствия паров воды интенсивность падающего на каплю луча также может изменяться. Однако специально поставленные опыты показали, что для малых капель водоугольной суспензии тепловые флуктуации, связанные с изменением степени черноты топлива при горении, с присутствием паров воды или предполагаемых фотохимических эффектов, слабо влияют на исследуемый процесс.

Сбор и обработка измеряемой информации от первичных преобразователей (термопара — фотодиод) проводились по схеме: усилитель → аналого-цифровой преобразователь → компьютер → принтер. Тактовая частота считывания аналогового сигнала составляла 25 Гц.

Известно [1, 2], что в основе горения лежит интенсивный процесс, который определяется физико-химическими, аэродинамическими и тепловыми факторами. На рис. 1 представлен расширенный вариант схемы зажигания капель топлив. В частности, показана возможность использования установки для исследования парокислородной газификации, сжигания топлива в различных средах и различных аэродинамических и температурных условиях. В этом случае капля обдувается газом, паром и т. д.

В экспериментах исследовались динамика горения капли водоугольной суспензии [3], состоящей из смеси частиц угля размером $D = 10\text{--}350$ мкм ($C \approx 60\%$), 39% воды и небольшого количества ($\sim 1\%$ массы угля) пластификатора. Пластификатор представляет собой натриевые соли полиметилсульфокислоты. Твердая фракция суспензии приготавливалась одностадийным сухим помолом из углей сибирских месторождений.

Рис. 2 иллюстрирует динамику горения капли суспензии. Время горения коксового остатка велико по сравнению с остальными фазами, и конец этого процесса на графике не показан (конечная температура после сгорания коксового остатка 960°C , начальная — 30°C).

Термопарные и фотометрические измерения дополняют друг друга. Начальные стадии (прогрев капли, испарение воды) фотодатчиком не регистрируются. Датчик фиксирует эффекты при более высоких температурах (горение летучих и коксового остатка). Термопара постоянно следит за температурой внутри частицы, а фотодатчик срабатывает в момент вспышки летучих. Для проведенного эксперимента горение летучих начинается при $T \approx 600^\circ\text{C}$.

Зона 4 на рис. 2 характеризуется нестационарным процессом выделения летучих, уносом массы топлива и оттеснением от поверхности горения окислителя. Это приводит в дальнейшем к падению интенсивности свечения капли в стадии, предшествующей горению коксового остатка.

Дело в том, что при испарении воды и выделении летучих в капле суспензии сильно развивается внутриобъемная поверхность, в результате чего идет внутриворончатое окисление топлива с взрывным выделением и горением летучих. При исследовании динамики го-

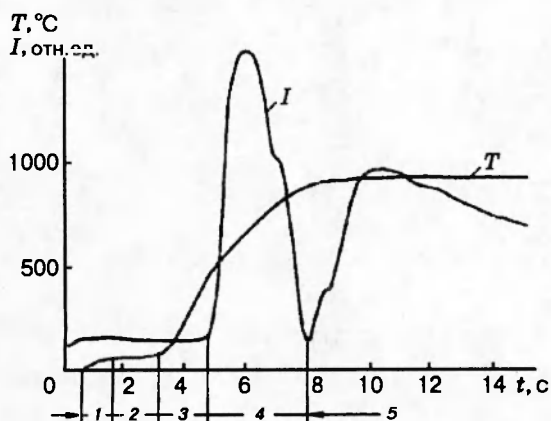


Рис. 2

Рис. 2. Временные фазы динамики горения капли водоугольной суспензии: диаметр капли $d = 2000$ мкм, $D = 68$ мкм; 1 — прогрев капли, 2 — испарение воды, 3 — выделение летучих, 4 — горение летучих, 5 — горение коксового остатка

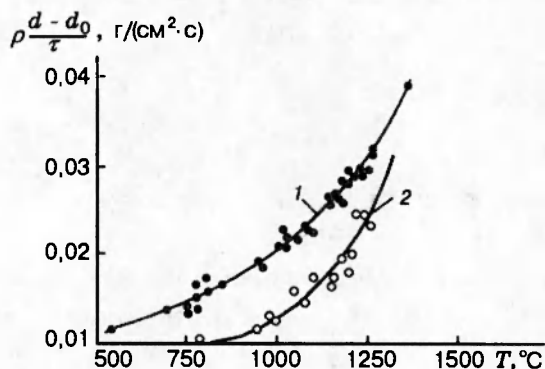


Рис. 3

Рис. 3. Массовая скорость горения капли суспензии (1) и предварительно высушенной капли (2):
 $d = 400-2000$ мкм, $D = 68-315$ мкм

рения предварительно подсушенных капель водоугольной суспензии двустадийное горение не наблюдается. Это, видимо, связано с тем, что в данном случае горение инициируется в основном на внешней поверхности капли с последующим гомогенным догоранием летучих в паровой фазе.

Вообще вопрос о том, что такое температура горения частиц, достаточно сложен. Дело в том, что в зависимости от условий эксперимента (реакционных свойств топлив, размера частиц, их пористости) температура поверхности частиц может превышать температуру в ее объеме. При очень высоких скоростях процесса горения и больших размерах частиц возможен градиент температур по их размеру. В наших экспериментах количественно фиксируемая характеристика процесса — это средняя температура внутри малой частицы суспензии, определяемая по показаниям малоинерционной термопары.

Сравнительные опыты, проведенные при омическом и лазерном нагревах капли водоугольной суспензии до разных температур, показали резкое возрастание интенсивности свечения в момент воспламенения летучих, а затем падение и последующее его повышение.

По данной методике проведены опыты с каплями различных диаметров ($d = 400-2000$ мкм) в диапазоне температур $T = 600-1400$ °С. Опытные данные обобщены в координатах $\rho(d - d_0)/\tau = f(T)$ (рис. 3). Здесь d_0 — диаметр спая термопары; ρ — плотность суспензии; τ — время существования капли до полного выгорания коксового остатка. Это время определяется по моменту резкого выхода кривой фотометрии на исходный уровень, которое практически совпадает с выходом температурно-временной характеристики (после догорания коксового остатка) на постоянное значение. Величину $\rho(d - d_0)/\tau$ можно рассматривать как эффективную массовую скорость горения капель топлива. Видно, что при одной и той же температуре коксового остатка массовая скорость горения капли выше, чем предварительно высушенной суспензии.

Это обстоятельство может быть связано как с частичным взаимодействием углерода

(наряду с кислородом) с парами воды (парокислородная газификация), так и развитием окислительной поверхности вследствие микровзрывного характера горения из-за интенсивного испарения воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Канторович Б. В.** Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
2. **Хитрин Л. Н.** Физика горения и взрыва. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957.
3. **Edward T. M.** Coal-water fuel combustion // 21st Symp. (Int.) on Combustion. Combustion Institute, 1986. P. 159–171.

*Поступила в редакцию 20/VI 1995 г.,
в окончательном варианте — 13/XII 1995 г.*
