

Таблица 2

Топливо	NO ₂ , г/ГДж	NO _x / ПДК× ×10 ⁻⁶	SO ₂ , г/ГДж	SO _x / ПДК× ×10 ⁻⁶	БП, мкг/ГДж	БП/ПДК× ×10 ⁻⁶	Σ/ПДК× ×10 ⁻⁶
Сланец	109	1,283	414	0,828	25	0,025	2,136
Сланцевое мас- ло из УТТ-3000	89	1,047	320	0,640	100	0,1	1,787

с учетом влияния серы на окисление атмосферного и топливного азота [2] можно сделать вывод, что доля топливных окислов азота в общем выбросе окислов азота составляет ~70%. Доля топливного азота, перешедшего в окислы, около 20%.

Концентрация окислов серы в дымовых газах при основных режимах составляет 1,1 г/м³. Баланс серы по содержанию в дымовых газах и топливе указывает на то, что основная часть серы входит в состав органических соединений топлива, сгорающих полностью при топочных процессах.

Как показал анализ отобранных проб на содержание БП, при основном режиме горения с дымовыми газами выделяется в среднем 40 мкг/100 м³ БП. Установлено также присутствие в пробах и других ПАУ.

На основе полученных данных проведена сравнительная оценка вредности выбросов с дымовыми газами при сжигании сланцевого масла УТТ-3000 и пылевидного эстонского горючего сланца. В табл. 2 приведены значения величины выбросов окислов азота (в пересчете на NO₂), окислов серы (в пересчете на SO₂), бенз(а)пирена (БП) на единицу потенциального тепла топлива, а также суммарная относительная вредность выбросов (Σ). Из таблицы видно, что суммарная относительная вредность выбросов при сжигании сланцевого масла УТТ-3000 приблизительно на 20% меньше, чем при пылевидном сжигании эстонского горючего сланца. Недостатком данного сравнения является то, что данные относительно масла УТТ-3000 получены в стендовых условиях. Проведенное сравнение относится только к сжиганию исследованных топлив в парогенераторах. Кроме этого, следует учитывать, что производство сланцевого масла сопровождается значительными вредными выбросами.

Все анализы на содержание БП и других ПАУ проведены в Институте химии АН ЭССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Отс, Д. М. Егоров, К. Ю. Саар. Теплоэнергетика, 1979, 4, 68.
2. А. А. Отс, Д. М. Егоров, К. Ю. Саар. Теплоэнергетика, 1982, 12, 15.

УДК 536.46 : 535.417

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В. С. Абриков, А. Э. Аверсон, В. М. Мальцев

(Чебоксары)

Методы интерферометрии находят в последнее время разнообразное применение в исследовании процессов горения конденсированных систем [1—4]. В [5] разработан новый подход к применению интерферометрии, позволяющий определять целый ряд интегральных характеристик процесса. В основе подхода лежит возможность достаточно простого

определения по интерферограмме газовой фазы горения ее массы:

$$m = [(n_0 - 1) V - \lambda \int \int S(x, y) dx dy] / k,$$

где k , V — средняя постоянная Гладстона — Дала газовой фазы и ее объем, n_0 — показатель преломления невозмущенной среды, окружающей газовую фазу; λ — длина волны; $S(x, y)$ — распределение разности фаз интерферирующих лучей в плоскости интерферограммы в единицах 2π . Здесь принята декартова система координат, ось y совпадает с вертикалью, интегрирование по x , y ведется в пределах изображения газовой фазы. Найденное значение m позволяет с помощью известных соотношений определить среднюю плотность и температуру, полную и среднюю удельную энтальпию, а также некоторые другие аналогичные интегральные характеристики. Для всех интегральных характеристик могут быть получены профили по высоте над поверхностью образца и временные зависимости.

Наиболее широки возможности данного подхода при исследовании начальных моментов процесса зажигания — до тех пор, пока вся образующаяся газовая фаза видна на кадрах кинофильма. В этом случае по временной зависимости m можно определить массовую скорость горения \dot{m} (в г/с), а также оценить производные от нее величины: среднюю линейную скорость горения u и среднюю линейную скорость потока газовой фазы v . Кроме того, по m можно определить объем и высоту выгоревшего к данному моменту времени слоя образца.

По временным зависимостям полной и удельной энтальпии H_y возможно изучение кинетики тепловыделения. По профилям H_y и v в слое газа толщиной Δy можно определить профиль скорости тепловыделения $\Phi = (\Delta H_y / \Delta y)v$, а через \dot{m} и профиль удельной энтальпии H_y — профиль мощности конвективного потока тепла $q_k = H_y \dot{m}$. При известной \dot{m} эти величины можно определить и для других режимов горения. При справедливости для исследуемого объекта псевдоодномерного приближения [6] профиль Φ позволяет изучать зонную структуру газовой фазы, а Φ и q_k — определять мощность потока тепла за счет теплопроводности q_λ от газа к поверхности образца. Для определения последней необходимо выбрать слой газовой фазы от поверхности образца y_1 до сечения y_2 с максимальной средней температурой, где мощность потока тепла за счет теплопроводности можно положить равной нулю. Тогда в случае стационарного горения

$$-q_\lambda(y_1) + q_k(y_1) - q_k(y_2) + \Phi m = 0,$$

где все величины кроме q_λ известны. Если разбить данный слой на несколько, а счет вести, начиная с верхнего, то можно найти распределение q_λ по y . В принципе, можно решать и нестационарную задачу — тогда в правой части уравнения должна стоять dH/dt .

В настоящей работе проведены исследования процессов зажигания нитроцеллюлозы и модельных смесевых композиций на основе перхлората аммония под действием лазерного излучения и погасания последних на металлической подложке. Для поджигания образцов использовался лазер ЛТН-101, $\lambda = 1,06$ мкм, при этом торцевая поверхность образцов покрывалась тонким слоем графита. Плотность излучения $Q = 300$ Вт/см². В одном случае (образец 1) использован лазер ЛГ-25, $\lambda = 10,6$ мкм, $Q = 150$ Вт/см², поверхность образца не графитировалась.

Эксперименты проводились при нормальных условиях в атмосфере воздуха. В некоторых случаях по интерферограммам проведен расчет полей показателя преломления в газовой фазе и температуры. При определении T использовалась формула, полученная из уравнения Гладстона — Дала и основного газового закона: $n - 1 = pK_n / RT$, где $K_n = k_n$ — молекулярная рефракция. Эта формула объединяет зависимость n от давления, температуры, а также от состава газа и молекулярной массы (через K_n). Проведенные оценки показали, что для большого числа хими-

ческих реакций, протекающих при горении, разница K_u начального и конечного состояния небольшая, поэтому расчет T можно проводить, предполагая наличие в газовой фазе смеси конечных продуктов сгорания данного топлива.

При расчете m объем газовой фазы считался по контуру интерферограммы в предположении осесимметричности потока, двойной интеграл — по известной методике [7]. Значения k , а также других необходимых констант рассчитывались для смеси конечных продуктов горения. За площадь горения при зажигании принималось значение площади сечения лазерного луча.

Начальные моменты процесса зажигания. Исследовались следующие образцы: № 1 — ПХА + полиметилметакрилат (ПММА) + 2% Fe_2O_3 , коэффициент избытка окислителя $\alpha = 1,0$; № 2 — ПХА + ПММА, $\alpha = 1,5$; № 3 — ПХА + полистирол, $\alpha = 1,0$; № 4 — нитроцеллюлоза. Лазерное излучение действовало в течение всего времени наблюдения, которое составляло, считая от времени появления газовой фазы над образцом, для № 1 — 0,061, № 2 — 0,036, № 3 — 0,047 и № 4 — 0,026 с.

Следует отметить, что, когда поверхность образца не графитировалась, наблюдалась резко выраженная стадийность процесса зажигания. Зависимость $m(t)$ имела вначале два последовательных, примерно прямых участка с $\dot{m} = 0,0009$ и $0,0017$ г/с, после которых следовал участок экспоненциального роста (в его начале $\dot{m} = 0,0066$, в конце — $0,0960$ г/с). Он завершался выходом на стационарный режим с $\dot{m} = 0,1164$ г/с и $u = 1,49$ см/с. Временная зависимость H_y показала, что первые два участка соответствуют процессу типа испарения или сублимации: H_y сохраняет примерно постоянное значение порядка 250 000 Дж/кг; в дальнейшем она резко возрастает, достигая максимума 830 000 Дж/кг в конце участка экспоненциального роста m ($t = 0,048$ с), затем наблюдается ее спад.

Для образцов с графитированной поверхностью с самого начала наблюдается экспоненциальный рост m , который завершается выходом на прямолинейный участок $m(t)$ (стационарный режим): для образца № 2 — $\dot{m} = 0,0665$ г/с, $u = 1,18$ см/с; № 3 — $\dot{m} = 0,1030$ г/с; $u = 1,37$ см/с; № 4 — $\dot{m} = 0,0683$ г/с, $u = 1,13$ см/с. Максимальное значение H_y достигается очень быстро: в случае № 2 — $H_{y \max} = 580 000$ Дж/кг ($t = 0,009$ с); № 3 — $H_{y \max} = 800 000$ Дж/кг ($t = 0,012$ с), № 4 — $H_{y \max} = 410 000$ Дж/кг ($t = 0,007$ с). Средняя толщина выгоревшего ко времени достижения $H_{y \max}$ слоя составляет для образцов № 2 и 3 — 0,01 мм, № 4 — 0,024 мм, для № 1 она значительно больше — 0,081 мм.

Момент достижения $H_{y \max}$, очевидно, соответствует окончанию процесса воспламенения продуктов газификации, причем по своему характеру он приближается к тепловому взрыву. Это позволяет сравнивать энергетику топлив примерно в идентичных условиях. Приведенные выше значения показывают влияние α (образцы 1 и 2) и рода горючего и окислителя (№ 1, 3, 4).

Выход на режим горения. Качественный анализ интерференционных фильмов показывает, что для рассмотренных трех смесевых композиций сразу после воспламенения продуктов газификации в процессе подъема области воспламенения устанавливается стационарная интерференционная картина.

Для неграфитированного образца (№ 1) после сброса излучения ($t \sim 0,2$ с) наблюдалось кратковременное изменение удельной энтальпии газовой фазы: небольшой спад, резкое увеличение и снова спад до первоначального значения H_y . Продолжительность переходного процесса $\sim 0,07$ с. Для образцов № 2, 3 с покрытой графитом торцевой поверхностью (плохо поглощающих излучение с $\lambda = 1,06$ мкм) сброс излучения не отражался на характере процесса. Это связано, очевидно, с тем, что практически сброс лазерного излучения (большой части его мощности) произошел в начале процесса — после уноса слоя графита ($t = 0,015$ с).

В этот момент скорость горения примерно соответствовала собственной характерной скорости горения образца.

Образец 4 в проведенном эксперименте на режим горения не вышел. После кратковременного периода стационарного выгорания ($t = 0,024 \div \div 0,044$ с) начались колебания (лазерное излучение еще продолжало действовать) с частотой ~ 30 Гц, в процессе колебаний значение H_y менялось от 330 000 до 230 000 Дж/кг. После сброса излучения, момент которого совпал с моментом уменьшения H_y , последовало резкое увеличение H_y до 310 000 Дж/кг, затем еще более резкий спад до 190 000 Дж/кг, снова увеличение до 240 000 Дж/кг, затем образец погас.

Колебания горения при погасании на металлической подложке. Ранее проведенные эксперименты [4] показали, что при погасании на металлической подложке для некоторых смесевых композиций наблюдаются колебания интенсивности горения. Ниже кратко обсуждаются результаты, полученные в настоящей работе для образца ПХА + ПММА, $\alpha = 0,5$. В процессе погасания отмечено два колебания. Перед колебаниями (стационарное горение) $H_y = 550 000$ Дж/кг, далее оно менялось так (время указано от момента стационарного горения): 0,437 с — 470 000 Дж/кг, 0,469 с — 750 000 Дж/кг, 0,500 с — 1 280 000 Дж/кг, 0,625 с — 450 000 Дж/кг, 0,688 с — 1 040 000 Дж/кг, 0,906 с — 760 000 Дж/кг, 1,031 с — 370 000 Дж/кг, 1,250 с — образец погас.

Причины колебаний интенсивности горения ясны [8]. Особенность данного случая в аномально больших значениях H_y , наблюдающихся в некоторые моменты времени. Эти величины превосходят даже $H_{y \max}$, которые отмечаются при воспламенении. Расчеты полей n в газовой фазе в моменты, соответствующие аномально высоким H_y , показали, что в довольно значительной области газовой фазы n имеет значения, меньшие единицы, что может быть только при наличии в газе большого количества свободных электронов (с концентрацией не меньше 10^{17} см $^{-3}$). Возможной причиной появления свободных электронов может быть термоэлектронная эмиссия с поверхности, например, частиц сажи. Здесь следует отметить, что подобные аномально высокие величины H_y и $n < 1$ наблюдаются в некоторых случаях для верхней части области воспламенения продуктов газификации, где реализуется наибольшая температура газа. Выяснение этого вопроса требует дальнейших исследований, при этом особое внимание необходимо обращать на обеспечение максимально достижимой точности интерферометрических измерений.

Приведенные в данной работе примеры показывают широкие возможности нового подхода к применению интерферометрии. Сочетание его с качественным анализом процесса по интерферограммам и расчетом полей температур позволяет проводить достаточно полное изучение механизма некоторых режимов горения.

Авторы выражают признательность А. Л. Илларионову и А. П. Кондратьеву за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Mutoh, T. Hirano, K. Akita. 17-th Symp. (Intern.) Combust. Pittsburgh, 1978.
2. A. K. Gupta, I. Rossi. AIAA Paper, 1980, N 349.
3. T. Kashiwagi, T. J. Ohlemiller, T. Kashiwagi. AIAA Paper, 1981, N 180.
4. В. С. Абриков, В. М. Мальцев. Физика горения и методы ее исследования/Под ред. С. А. Абрикова. Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1982.
5. В. С. Абриков, В. М. Мальцев, В. Д. Кочаков и др. Там же.
6. Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. Структура пламени. М.: Металлургия, 1969.
7. М. Я. Выгодский. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1977.
8. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973.