

Постоянство температуры частицы на участке стационарного горения подтверждает справедливость предположения, сделанного в [5]. Отсутствие зависимости стационарной температуры горения частиц алюминия от интенсивности подвода тепла извне в отличие от [6], по-видимому, связано с особенностями нагрева металла лазерным излучением [11], которое может экранироваться продуктами факела.

Поступила в редакцию 9/II 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Friedman, A. Masek. Comb. and Flame, 1962, 6, 9.
2. А. Меллор, И. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
3. D. Kuehl. Pyrodynamics, 1965, 3, 65.
4. R. Friedman, R. Nugent. 6-th Symp. (International) on Comb. N. Y., Reinhold Publishing Corp., 1957.
5. R. Bonrianes. Comb. Inst. Fur. Symp. 1973. London — New York, 1973.
6. Е. М. Деревяга, Л. И. Стесик, Э. А. Федорин. ФГВ, 1977, 13, 6.
7. Т. Бржустовский, И. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
8. А. А. Раздобреев, А. И. Скорик, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1976, 12, 2.
9. Ю. Е. Нестерихин, Р. И. Солоухин. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М.: Наука, 1967.
10. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972.
11. Г. С. Романов, К. Л. Степанов. ЖПС, 1968, 8, 753.

УДК 621.43.019.7 : 546.26

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 2 МПа

Ф. Г. Бакиров, Н. Х. Баширов, В. М. Захаров, И. З. Полецук, Э. Г. Шайхутдинов  
(Уфа)

Механизм и количественные характеристики сажеобразования в пламенах при высоких давлениях изучены недостаточно [1], что связано со значительными методическими трудностями в организации экспериментов. Закономерности процесса наиболее удобно исследовать при горении гомогенных топливно-воздушных смесей, когда отсутствует влияние таких факторов, как испарение топлива и смешение. Сложность задачи обусловлена тем, что необходимо создать условия для полного испарения и смешения с воздухом углеводородного топлива при одновременной гарантии отсутствия самовоспламенения и предотвратить возможность проскока пламени из реакционной зоны в систему предварительной подготовки топливно-воздушной смеси. Кроме того должно быть разрешено противоречие между необходимостью обеспечения стабилизации пламени в горелке и поддержанием достаточно высокой скорости потока с целью развертки хода процесса во времени. Ниже рассматривается методика исследований сажеобразования при давлениях до 2 МПа.

Основные требования, принятые во внимание при разработке и создании экспериментальной установки (рис. 1): гомогенность и однородность по составу топливно-воздушной смеси перед реакционной зоной, достаточно широкий диапазон изменения давления, состава смеси, времени пребывания, а также теплоотвода из зоны горения, обеспечение удовлетворительной точности результатов экспериментов. Помимо установки ГС-1 экспериментальный комплекс включал в себя системы подогрева и подачи топлива и воздуха, отбора продуктов сгорания, дистанционного управления режимами работы установки, контрольно-измерительную аппаратуру и др. Горение богатых гомогенных смесей происходило в реакционной трубе с внутренним диаметром 0,038 м, устанавливаемой после стабилизирующей решетки с 32—40 отверстиями диаметром 0,0005 м. Применение реакционных труб различной длины, выполненных из различных материалов (кварц, керамика, псевдосплав ВНС-1), а также охлаждаемых водой или воздухом стальных труб позволяло варьировать условиями теплоотвода из реакционной зоны и временем пребывания.

Оптимальные условия для полного испарения впрыснутого через пневматический распылитель топлива и смешения с воздухом в карбюраторе подобраны на основе серии предварительных расчетов на ЭВМ ЕС-1020: максимальный диаметр капель топлива 60—70 мкм, длина испарительного участка 1 м, время пребывания смеси в карбюраторе  $\tau_{пр} \geq 0,1$  с, температура смеси на выходе из него не ниже 150—160°C при сжигании *n*-гексана и не ниже 200°C при работе на керосине ТС-1. Контроль гомогенности топливно-воздушной смеси в начальном сечении реакцион-

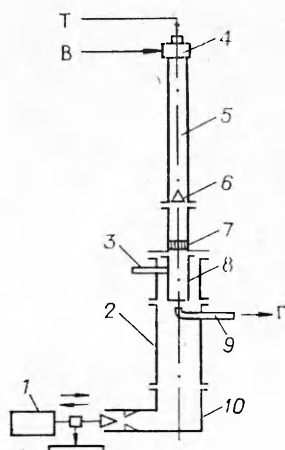


Рис. 1. Установка ГС-1 (генератор сажи).

1 — узел, регулирующий давление в камере сгорания; 2 — барокамера; 3 — электросвеча; 4 — распылитель; 5 — карбюратор; 6 — турбулизатор; 7 — решетка стабилизирующая; 8 — реакционная камера; 9 — отборник сажи; 10 — выхлопной узел; Т — ввод топлива; В — ввод воздуха; Г — отбор газа.

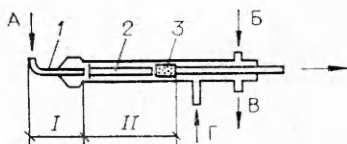


Рис. 2. Принципиальная схема отборника сажевых частиц. I — неохлаждаемый участок; II — охлаждаемый участок. А — вход продуктов сгорания; Б — вода на охлаждение отборника; В — выход воды; Г — азот на продувку отборника.

ной зоны проведен контактным способом, основанным на вводе в поток пластинки, покрытой сажей и тонким слоем окиси магния, и оптическим методом с помощью лазера ЛГ-56, а однородность оценивалась по степени равномерности температурного поля в поперечном сечении реакционной трубы при горении.

В конечном счете установка ГС-1 позволяла проводить исследования по сажеобразованию в диапазоне параметров: давление  $p = 0,1 \div 2,0$  МПа, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0,3 \div 0,7$ ,  $\tau_{пр} = (1 \div 20) \cdot 10^{-3}$  с. Горение богатых гомогенных углеводородно-воздушных смесей изучалось комплексно и включало в себя температурные измерения, определение концентрации сажи в продуктах сгорания и дисперсности сажевых частиц, газовый анализ и измерение ионизации пламени. Кратко рассмотрим методику определения концентрации сажи в продуктах сгорания и некоторые результаты экспериментов.

Для количественных исследований выбран метод фильтрации продуктов сгорания с применением сажевых пробоотборников, удобный для локальных измерений в потоке и изучения кинетики процесса. Конструктивная схема разработанного авторами сажевого отборника представлена на рис. 2. Он включает в себя неохлаждаемый наконечник с кварцевой трубочкой 1, охлаждаемый участок со съемной трубкой 2, съемный фильтр из пористой керамики 3. Подобное сочетание позволило свести к минимуму воздействие отборника на исследуемый поток и обеспечить эффективную «закалку» продуктов сгорания.

В ходе эксперимента через пробоотборник просасывалось  $(3 \div 10) \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> газа, а время отбора регулировалось подачей и отсечкой продувки азотом. Определение количества сажи, осевшей на съемных трубке и фильтре, проводилось взвешиванием на аналитических весах WA-34 и методом выжигания сажи в токе кислорода

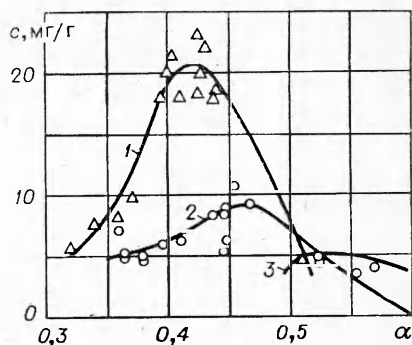


Рис. 3. Зависимость концентрации сажи в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха при различном охлаждении стенок реакционной камеры. Топливо — *n*-гексан,  $p = 1,06$  МПа.

1 — реакционная камера адиабатная; 2 — реакционная камера, охлаждаемая водой; 3 — данные [2] для  $p = 1,1$  МПа.

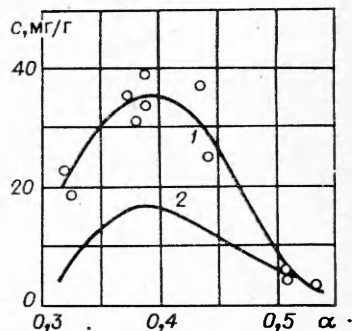


Рис. 4. Зависимость концентрации сажи в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха. Топливо — гексан-1,  $p = 1,06$  МПа.

1 — реакционная камера адиабатная; 2 — данные [2].

при 900°C с последующим анализом количества CO<sub>2</sub> на хроматографе Н-503. До эксперимента и после него съемная труба и фильтр подвергались сушке при 130°C в течение 1 ч для исключения влияния влажности. Весовой метод более практичен при больших количествах отфильтрованной сажи, а метод выжигания в токе кислорода — при малых. Оценка степени точности результатов экспериментов показала, что предельные случайные погрешности определения массовой концентрации сажи составляют +3—5% при доверительной вероятности 0,9545. Для повышения надежности результатов опыты повторялись 4—5 раз.

В качестве примера использования предложенной методики на рис. 3 приведены данные экспериментов, характеризующие значительное влияние теплоотода из реакционной зоны на интенсивность сажевыделения при горении гомогенных гексапо-воздушных смесей ( $c$  — количество сажи по отношению к углероду топлива). Снижение температуры в зоне горения за счет теплопотерь ведет к уменьшению выхода дисперсного углерода, а «порог» сажеобразования по составу смеси смещается в сторону больших коэффициентов избытка воздуха. Сравнение с данными работы [2] показывает, что имевшиеся к настоящему времени экспериментальные результаты для давлений до 2 МПа отвечают условиям сажеобразования с существенным теплоотводом из зоны горения.

Влияние состава топливно-воздушной смеси на интенсивность сажеобразования показано на рис. 4 для случая сжигания гексана-1 в условиях, близких к адiabатическим. Данное топливо, как показывает сравнение с результатами, приведенными на рис. 3, имеет большую склонность к сажевыделению при горении, чем *n*-гексан, однако характер зависимости  $C = f(\alpha)$  идентичен.

Приведенные данные свидетельствуют об эффективности разработанной методики экспериментальных исследований, обеспечивающей широкие возможности по изучению характеристик сажеобразования в пламенах гомогенных топливно-воздушных смесей при высоких давлениях.

Поступила в редакцию 7/IV 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Теснер. ФГВ, 1979, 15, 2.
2. J. J. Macfarlane, F. H. Holderness, F. S. Whitcher. Comb. Flame, 1964, 8, 3.

#### Поправки

В № 2 1981 г. на стр. 148 в 23 строке сверху следует читать: «... составляет 0,002 г/норм · м<sup>3</sup>».

В № 4 1981 г. на стр. 143 в 23, 24, 28 строках сверху следует читать «нитрит-ион».

В № 4 1981 г. на стр. 12 10 строка сверху вместо выражения  $S_{ПХА} = 6/D_{ПХА}$  следует записать:  $S_{ПХА} = (6/D_{ПХА}) (\beta_{ПХА} - 1) \ln (1 - \beta_{ПХА})$   
 [9]. Подстановка этого выражения в (4) даст  $\left( \frac{-2}{3} \right) [D_{ПХА} / \ln (1 - \beta_{ПХА})]$ , после чего в (5) имеем  $A = [-2/3 \ln (1 - \beta_{ПХА})] [\beta_{Al} / (1 - \beta_{ПХА})]^{1/2}$ . С этим значением  $A$  выполнены расчеты величин  $D_{агл}^{расч}$ .