

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремни А. П., Савров С. Д., Трофимов В. С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах.— М.: Наука, 1970.
2. Frey R. B. VIII-th Symp. (Intern.) on Detonation (preprint). V. 1, 1985.
3. Seay G. E., Seely L. B. J. Appl. Phys., 1961, 32, 6, 1092.
4. Chaudhri M. M., Field J. E. Proc. Roy. Soc., 1974, A 340, 113.
5. Starkenberg J. VII-th Symp. (Intern.) on Detonation (preprint), 1981.
6. Соловьев В. С., Лазарев В. В., Андреев С. Г. ФГВ, 1983, 19, 4, 130.
7. Randolph A. D., Simpson K. O. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1976, 15, 1, 7.
8. Дубовик А. В., Боболев В. К. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару.— М.: Наука, 1978.
9. Пигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
10. Хасанов Б. А. и др.— В кн.: Детонация. Вып. 2.— Черноголовка, 1981.
11. Хасанов Б. А., Борисов А. А., Ермолаев Б. С.— В кн.: Детонация и ударные волны.— Черноголовка, 1986.
12. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1966.
13. Страковский Л. Г., Уляков П. И., Фролов Е. И.— В кн.: Горение конденсированных систем/Под ред. А. Г. Мержанова.— Черноголовка, 1977.
14. Страковский Л. Г., Фролов Е. И. ФГВ, 1980, 16, 5, 140.
15. Аверсон А. Э., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. ФГВ, 1968, 4, 1, 20.
16. Беляев А. Ф. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
17. Кондриков Б. П. и др.— В кн.: Детонация. Вып. 2.— Черноголовка, 1981.

*Поступила в редакцию 12/VI 1986,
после доработки — 27/XI 1986*

К ВОПРОСУ О САЖЕОБРАЗОВАНИИ В ПЛАМЕНИ СМЕСЕЙ ХЛОРА С УГЛЕВОДОДАМИ

*А. В. Стеблев, Ю. Е. Фролов
(Москва)*

Исследованию образования углерода при пиролизе и неполном окислении углеводородов кислородом посвящены работы [1, 2], в которых изучены закономерности этого явления и предложены объясняющие их теоретические концепции. В то же время вопросы сажеобразования при горении углеводородов с хлором изучены крайне недостаточно.

Данная работа поставлена с целью изучения сажеобразования в пламени смесей хлора с углеводородами. Рассмотрено образование сажи в стационарном пламени бипарных смесей метана, этана, пропана и этилена с хлором, а также влияние предварительного нагрева и инертных разбавителей на этот процесс.

Смесь углеводорода с хлором поступала в горелку (стеклянную трубку с внутренним диаметром 2, 5, 10 и 14 мм, длиной 200 и 300 мм), помещенную в замкнутый цилиндрический сосуд объемом 1000 см³ с водоохлаждаемым днищем диаметром 100 мм. Расход смеси 250—1600 мл/мин, продолжительность опытов составляла от 2 до 100 мин. Горение инициировали электрическим разрядом от высоковольтного индуктора ИВ-100. Пламя стабилизировали при помощи стержня, размещенного нормально потоку у кратера горелки. Сажу собирали на водоохлаждаемой осадительной поверхности. Для определения количества образующейся сажи и обеспечения полноты ее снятия со стенок газогорелочное устройство промывали хлороформом и спиртом, а также протирали предварительно взвешенным комком ваты, смоченным указанными растворителями. Затем все содержимое переносили на фильтр и промывали водой до нейтральной реакции; высушенный фильтр с ватой и сажой взвешивали. Содержимое сажи определяли в трех параллельных опытах. Отклонение результатов определения от среднего значения не превышало 12% измеряемой величины.

Зависимость мольной доли исходного углеводорода ϵ , превращенного в сажу, от мольного содержания горючего в смеси π представлена на

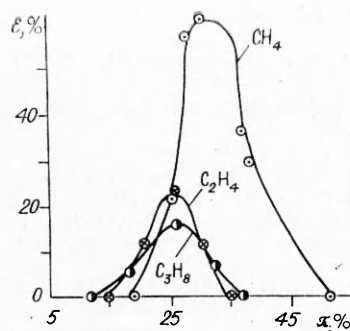


Рис. 1. Зависимость доли исходного углеводорода, превращенной в сажу от его содержания в бинарной смеси с хлором.

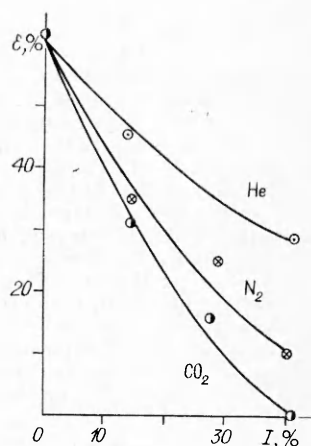


Рис. 2. Зависимость выхода сажи от содержания разбавителя I в смеси $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 + I$ при $\text{CH}_4/\text{Cl}_2 = 0,43$.

рис. 1. Наибольшая склонность к сажеобразованию наблюдается у метана. В смесях $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2$ величина ϵ достигает 62% при концентрации CH_4 30–34%. При горении смесей пропана и этилена с хлором ϵ не превышает соответственно 17 и 25%. Концентрационные области сажеобразования и воспламенения бинарных смесей углеводородов с хлором представлены в таблице.

Оценка максимальной температуры в зоне горения изученных смесей углеводородов с хлором, проведенная платина-платинородиевыми термонарами с диаметром сая 0,7; 0,5; 0,3; 0,1 и 0,05 мм с последующим экстраполированием к нулевому диаметру, показала, что она не превышает 1600 К. Иодометрическое определение содержания хлора в продуктах сгорания смесей $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2$ показало, что в области сажеобразования количество непрореагировавшего хлора максимально при содержании CH_4 в исходной смеси 18,5% и составляет 21% от первоначального. В области составов, при горении которых сажеобразование максимально, продукты реакции практически не содержат свободного хлора.

Установлено, что предварительный нагрев хлоруглеводородных смесей от 298 до 473 К сдвигает начало сажеобразования в сторону бедных горючим составом на 10–15% от первоначального. При нагреве выше 550 К смеси хлора с углеводородами самовоспламенялись. Введение в систему углеводород — хлор инертных разбавителей (He , N_2 , CO_2) способствует уменьшению и прекращению сажеобразования. Например, добавление к гомогенной смеси, содержащей 19,5% C_2H_4 , 30% CO_2 , приводит к прекращению сажеобразования. Следует отметить, что количество необходимого для этого разбавителя пропорционально расходу смеси и теплоемкости инертного газа. Рис. 2 иллюстрирует сравнительную эффективность воздействия разбавителей на выход сажи в пламенах углеводородов с хлором. По своему влиянию на сажеобразование разбавители располагаются в следующем порядке: $\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{He}$.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном сажеобразовании при горении смесей углеводородов с хлором. В этих пламенах образование сажи прекращается задолго до достижения верхнего концентрационного предела воспламенения (см. таблицу), а предварительный разогрев сдвигает начало ее образования в сторону бедных горючим составов. Как известно [1, 2], в углеводородовоздушном пламени соединения с большим отношением углерод/водород обнаруживают большую склонность к дымлению.

| Углеводород | Концентрационная область | |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| | сажеобразования, % | воспламенения (данные [3]), % |
| CH_4 | 18,5–52,0 | 5,6–63,0 |
| C_2H_6 | 13,0–45,0 | 4,9–55,4 |
| C_2H_4 | 13,7–35,0 | — |
| C_3H_8 | 11,5–37,0 | 4,3–50,0 |

В хлор-углеводородных пламенах, как это видно из рис. 1, картина обратная.

Высокий выход сажи при горении в хлоре можно объяснить легкостью пиролиза образующихся хлорорганических соединений. Прекращение сажеобразования в пламени богатых горючим смесей, вероятно, связано с тем, что температура таких пламен недостаточно высока для того, чтобы в них могли происходить процессы разложения.

Эффект прекращения образования сажи при введении в пламя инертных разбавителей, а также заметное влияние предварительного разогрева на границы дымообразования позволяют поставить вопрос о возможности управления процессом сажеобразования при взаимодействии хлора с углеводородами в режиме горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теснер П. А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы.— М.: Химия, 1972.
2. Шахла Р. Л., Макдовальд Т. П. Вопросы ракетной техники, 1956, 5, 69.
3. Мальцева А. С. Канд. дис.— М., 1972.

*Поступила в редакцию 12/VI 1986,
после доработки — 30/X 1986*

О МЕХАНИЗМЕ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ В АЭРОВЗВЕСЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

*В. Г. Шевчук, А. К. Безродных, Л. В. Бойчук,
Е. Н. Кондратьев*

(Одесса)

Центральное место в теории и практике волнового горения занимает проблема ламинарного пламени. Это обусловлено тем, что, во-первых, установлению любого режима распространения пламени предшествует стадия ламинарного течения процесса; во-вторых, для данного процесса зачастую удается абстрагироваться от гидродинамических эффектов, вызванных тепловым расширением продуктов сгорания (или достаточно просто их учесть), что позволяет аналитически анализировать проблему; в-третьих, это наиболее доступный для экспериментального изучения режим. Наконец, нормальная скорость пламени является важной сравнительной характеристикой, позволяющей оценивать «активность» горючей смеси по отношению к реализации иных режимов горения.

Принципиально важен при изучении ламинарного пламени вопрос о механизме передачи тепла в предпламенную зону. Применительно к аэровзвеси частиц металлов речь может идти о соотношении кондуктивного потока тепла из зоны горения и радиационного потока из зоны высокотемпературных конденсированных продуктов сгорания. Практически задача должна решаться прямыми оценками кондуктивного и радиационного вкладов, а также определением функциональной зависимости скорости пламени от основного параметра взвеси — размера частиц. Наличие такой информации делает возможным построение адекватной модели ламинарного пламени с учетом специфических особенностей газозвеси. Ниже такая программа реализуется для аэровзвеси частиц магния и алюминия, для которых термокинетические параметры известны в достаточной мере.

Нормальная скорость пламени определяется из системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику прогрева газового и твердого компонентов в предпламенной зоне (рассматривается плоский стационарный фронт пламени, распространяющийся в бесконечном про-