

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ja. B. Zeldovich, A. G. Istratov, N. I. Kidin e. a. Comb. Sci. Technol., 1980, 24, 1—2, 1.
2. В. И. Борисов. ФГВ, 1978, 14, 2, 26.
3. Ja. B. Zeldovich. Comb. Sci. Technol., 1981, 40, 3, 225.
4. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
5. В. П. Самсонов, С. А. Аbruков и др. ФГВ, 1982, 18, 6, 45.
6. Г. А. Барский, Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1950, 24, 3, 589.
7. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ КЕРОСИНА ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ

*В. Н. Груздев, М. Д. Тавгер*

*(Казань)*

Диапазон использования в технике двухстадийного горения чрезвычайно широк. По этому методу работают промышленные установки утилизации отходов нефтехимического производства, форсажные камеры авиационных двигателей, запальники и дежурные пламена, форкамерные автомобильные двигатели и т. п.

При конструировании установок, использующих двухстадийные процессы горения, каждую стадию горения рассчитывают обычно по единой методике с той лишь разницей, что расчет горения во второй стадии производят с учетом концентрации балластных газов, изменяющей содержание кислорода, и температуры, т. е. считают, что продукты сгорания первой стадии находятся в термодинамическом равновесии.

Вместе с тем при исследовании условий воспламенения углеводородного горючего во второй стадии двухстадийного процесса в [1—3] обнаружено, что двух параметров — концентрации кислорода и температуры потока — не всегда бывает достаточно для определения времени задержки воспламенения. Так, обнаружено, что температура  $T_v$ , при которой воспламеняется углеводородное горючее, зависит от скорости потока, расстояния  $L$  между зонами организации двухстадийного процесса горения, конструктивных особенностей проточного тракта, эффективности работы газогенераторов и др.

К числу основных возможных причин, обуславливающих неоднозначность процесса воспламенения, обычно относят наличие сажистых частиц в продуктах сгорания, температурную неоднородность потока и присутствие в нем химически активных частиц, причем сторонникам какого-либо одного определяющего фактора обычно противопоставляют другие причины, роль которых установить по результатам проведенного исследования практически невозможно. В предлагаемой работе поставлена цель — определить степень влияния перечисленных выше факторов на температуру воспламенения.

Сажистые частицы в потоке продуктов сгорания первой стадии горения могут инициировать воспламенение на поверхности или в пограничном слое в том случае, если температура частиц превышает среднюю температуру потока. Не останавливаясь на подробностях механизма сажеобразования, отметим, что температура поверхности частицы не превысит, очевидно, средней температуры самой горячей части зоны горения первой стадии. В качестве газогенератора в экспериментах использовали камеру сгорания, изготовленную на базе жаровой трубы авиадвигателя Д20П. Наличие сажистых частиц в продуктах сгорания определяли визуально по светящимся «трекам».

Температуру воспламенения керосина измеряли по методике, описанной в [3]. Она принималась равной температуре потока продуктов сгорания в момент вспышки и последующего устойчивого горения за желобковым стабилизатором пламени. В самую горячую зону газогене-

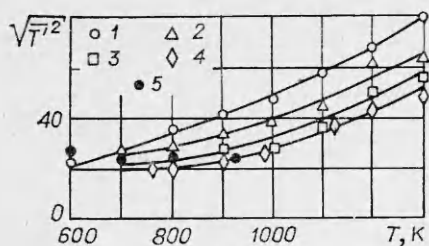


Рис. 1. Среднеквадратичное значение пульсаций температуры продуктов сгорания.

$T_{вх}$ , К: 1 — 360; 2 — 420; 3 — 500; 4 — 600.

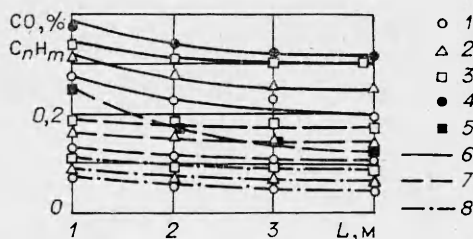


Рис. 2. Изменение концентрации CO (1—3) и  $C_nH_m$  (4, 5) по длине установки.

Температура первой стадии горения, К: 1 — 700, 2, 4 — 900, 3, 5 — 1100;  $T_{вх}$ , К: 6 — 360, 7 — 420, 8 — 600.

ратора через специальную трубку вдували мелкодисперсный (до 20 мкм) графитовый порошок. Сравнение результатов показало, что присутствие в потоке раскаленного, светящегося порошка графита не изменяет величину температуры воспламенения и, следовательно, не влияет на процесс воспламенения.

Сторонники чисто теплового механизма объясняют низкотемпературное воспламенение пульсациями температуры, за счет которых в предвзрывной период при низкой средней температуре продуктов сгорания возможно тепловое ускорение реакций. Температурная неоднородность, вызывающая пульсации температуры, обусловлена и самим механизмом горения, и конструктивными особенностями газогенераторов. Для количественной оценки температурной неоднородности потока использована методика измерения средней и пульсационной составляющей температуры, описанная в [4]. Из рис. 1 видно, что величина пульсации температуры пропорциональна средней температуре потока. Аналогичные данные получены и в других работах, например в [5].

Если на графике  $\sqrt{T'^2} = f(T)$  выделить значения температур, при которых происходило воспламенение, то окажется, что уровень пульсации одинаков (см. рис. 1, 5). Если принять механизм влияния пульсаций температур на воспламенение, описанный в [6], то условиям воспламенения должна удовлетворять зависимость, при которой амплитуда пульсаций увеличивается с уменьшением средней температуры, что противоречит экспериментальным данным. Отсюда следует, что низкотемпературное воспламенение, описанное в [1], не может быть обусловлено пульсациями температуры и объяснено в рамках модели теплового взрыва.

Возможность чисто химической активации воспламенения горючего во второй стадии за счет активных частиц, образующихся в ходе предварительного подгрева, непосредственно вытекает из теории цепного воспламенения Н. Н. Семенова [7] и обусловлена цепным механизмом горения углеводородов. Однако несложные вычисления показывают, что активные частицы, имеющие очень малое время жизни, практически исчезают за время прохождения продуктов первоначальной стадии горения по установке [1, 2]. Учитывая этот факт, многие исследователи исключали возможность химической активации как способа воспламенения горючего во второй стадии.

Активные частицы образуются в ходе химических превращений в реагирующей смеси. Наличие химических реакций может быть определено экспериментально по изменению концентрации реагентов. Проведены измерения концентрации CO и  $C_nH_m$  по длине участка установки, разделяющего зоны горения. Для воздействия на эффективность горения в первой стадии изменяли температуру воздуха на входе в газогенератор  $T_{вх}$ . Обнаружено (рис. 2), что реакции догорания протекают практически по всей длине установки, причем при понижении  $T_{вх}$  они идут интенсивнее. Отсюда следует, что если на участке, разделяющем стадии горения, происходят реакции догорания, то наличие активных частиц в продуктах в

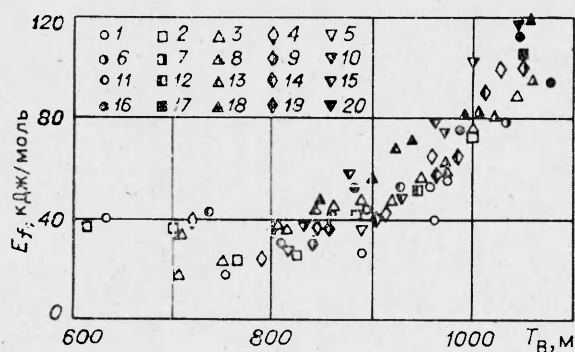


Рис. 3. Зависимость  $E_f(T_v)$ .

L, м: 1, 6, 11, 16 — 1,4; 2, 7, 12, 17 — 2; 3, 8, 13, 18 — 3; 4, 9, 14, 19 — 4; 5, 10, 15, 20 — 5;  $T_{вх}$ , К: 1—5 — 360, 6—10 — 420, 16—20 — 600.

этом случае можно считать доказанным. Сделанный в [1] вывод об эмиссии активных частиц из газогенератора и их последующей рекомбинации ошибочен.

В работе [9] показано, что существует связь между током ионизации  $I$  и скоростью химической реакции углеводородных смесей в виде

$$w^{0,93 \div 1,67} \sim I,$$

Обработка результатов измерений тока ионизации и концентрации несгоревшего горючего в продуктах сгорания [1] в виде макрокинетического соотношения позволила установить, что в описываемых экспериментах

$$I \sim w = A c_t c_v \exp(-E_f/RT),$$

где  $c_t$ ,  $c_v$  — концентрация несгоревшего топлива и воздуха;  $E_f$  — эффективная энергия активации реакции.

Эксперименты позволили определить значение эффективной энергии активации реакции догорания при различных  $T_v$ . Результаты расчетов величины  $E_f$  в момент воспламенения с помощью макрокинетического соотношения изображены на рис. 3, из которого видно, что низкотемпературное воспламенение ( $T_v = 600 \div 800$  К) происходит при  $E_f = 20 \div 40$  кДж/моль. Низкая величина  $E_f$  свидетельствует о радикальном или радикал-молекулярном характере реакций догорания, протекающих в продуктах, т. е. о наличии в них активных частиц. При более высоких значениях  $T_v$  эффективная энергия активации растет, что свидетельствует о все возрастающей роли молекулярных реакций в суммарной кинетике догорания.

Эксперименты, описанные в [1], проводили при постоянных с точки зрения газодинамики и горения условиях: развитое турбулентное течение, постоянный коэффициент избытка окислителя и т. д. Величины же температур воспламенения изменяли в чрезвычайно широком диапазоне: от 600 до 1300 К.

Зависимость температуры воспламенения от условий работы газогенератора и конструктивных особенностей установки может быть объяснена в рамках теории цепочно-теплого взрыва [7, 8] влиянием активных частиц, концентрация которых определяется теми же условиями и особенностями. Согласно этой теории, реакция воспламенения становится самоускоряющейся по достижению некоторого критического значения скорости ее протекания.

Известно, что при относительно высоких давлениях (порядка атмосферного) помимо разветвления цепей ускорение реакций происходит вследствие увеличения скорости тепловыделения и возникновения саморазгона. Исследователи этого класса реакций [8, 10] называют такой вид автокаталитического теплового взрыва цепочно-тепловым воспламенением.

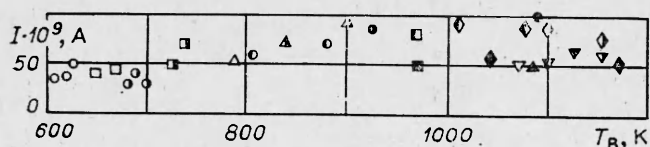


Рис. 4. Ток ионизации в момент воспламенения (обозначения см. на рис. 3).

Как отмечалось в [8], цепочно-тепловой взрыв встречается обычно в системах с вырожденно-разветвленными цепными реакциями (к которым относятся реакции окисления углеводородных горючих типа керосина), когда слабый механизм разветвления не в состоянии сам по себе привести к ускорению. В [8] отмечается, что при вырожденно-разветвленном механизме реакций воспламенение возможно только при достижении таких скоростей реакции и тепловыделения, при которых на цепное ускорение накладывается тепловой саморазогрев, приводящий к взрыву.

Для инициирования автокаталитической реакции необходимо каким-либо посторонним источником обеспечить образование некоторой начальной концентрации промежуточного компонента. Скорость автокаталитической реакции записывают в виде суммы [8]:

$$w = w_1 + w_2 = k_1(a - n)n \exp(-E/RT) + k_2(a, n) \exp(-E_i/RT),$$

где  $k_1$ ,  $k_2$  — константы;  $a$ ,  $n$  — концентрации исходного вещества и промотора.

Вторая реакция служит источником образования промежуточного компонента, обеспечивающего начальную скорость первой реакции. В данном случае функцию второй выполняет реакция догорания в продуктах сгорания газогенератора. На рис. 4 приведены значения тока ионизации  $I$  в продуктах сгорания в зоне организации второй стадии горения в момент воспламенения. Несмотря на значительный разброс точек, видно, что в момент воспламенения ток ионизации, а следовательно, и скорость реакции догорания  $w_2$  — величины постоянные, откуда следует, что необходимая для воспламенения начальная критическая скорость химической реакции обеспечивается реакциями догорания.

Авторы благодарят за участие в обсуждении результатов и ценные замечания В. Р. Кузнецова.

Поступила в редакцию 13/V 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Груздев, М. Д. Тавгер, А. В. Талантов. ФГВ, 1979, 15, 4, 84.
2. В. Н. Груздев, М. Д. Тавгер. — В кн.: Горение в потоке. Вып. 2. Казань, 1978.
3. В. Н. Груздев, И. А. Малишевская, А. В. Талантов. ФГВ, 1978, 14, 2, 170.
4. И. И. Власов и др. — В кн.: Струйная техника. М.: Наука, 1976.
5. Е. Е. Khalil. J. of Engineering for Industry, 1978, 100, 5, 210.
6. Л. А. Вулис. — В кн.: III Всесоюз. совещ. по теории горения. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. Н. Н. Семенов. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
8. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
9. Г. С. Аравин, Е. С. Семенов. ФГВ, 1979, 15, 5, 40.
10. В. В. Азатян, В. Т. Гонтковская, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1973, 9, 2, 163.

### ТЕОРИЯ ПИРОЛИЗА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. М. Гришин, С. П. Синицын

(Томск)

При математическом моделировании процесса горения композиционных полимерных материалов (КПМ) необходимо учитывать пиролиз материала, так как в результате пиролиза изменяется структура материала,