

зывается выше, в случае центробежной форсунки, т. е. удастся организовать горение на гораздо большем удалении от сопла.

Результаты исследования по поджиганию на всех четырех установках сведены на рис. 3 в виде зависимости $(\bar{L}_{пп})_{пр} = f(T_0)$. По этим результатам можно обнаружить довольно сильное качественное влияние полноты сгорания газов в струе на выходе из сопла на поджигающую способность. Так, при увеличении полноты сгорания в установке 2 с $\eta = 0,5-0,6$ до $\eta = 0,9$ поджигающая способность уменьшается с 21 калибра до 8. Такими же величинами $(\bar{L}_{пп})_{пр} \approx 16-21$ характеризуется поджигающая способность струи установки 3 с полнотой сгорания газов $\eta = 0,5-0,8$.

Поджигающая способность струй установок 1 и 4 с почти полным сгоранием газов одинакова и имеет низшее значение (около 8 калибров), как и в установке 2.

Из этих результатов следует, что струи, близкие по своему составу к инертным (т. е. с минимальным содержанием радикалов), обладают наиболее слабой поджигающей способностью.

Результаты поджигания инертной струей горячих газов показывают, что предельное расстояние до фронта пламени, отнесенное к начальному диаметру струи (сопла), одинаково для различных диаметров сопла в диапазоне от 50 до 500 мм. Поскольку относительное распределение температуры вдоль оси струи определяется относительным расстоянием в калибрах струи, то масштаб турбулентности, пропорциональный размеру струи, не играет существенной роли при воспламенении топлива. Влияние начальных температуры и скорости потока на поджигающую способность струи оказалось довольно слабым, что объясняется, по-видимому, довольно крутым падением этих параметров по оси струи, вытекающей в затопленное пространство.

О ПОЛНОТЕ СГОРАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО В СОСТАВЕ СМЕСЕВЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В. А. Бабук, В. П. Белов, Г. Г. Шелухин

(Ленинград)

От полноты сгорания металлического горючего зависит отличие реальной температуры продуктов сгорания гетерогенных металлсодержащих систем от расчетного термодинамического значения. Следовательно, по экспериментальной зависимости температуры продуктов сгорания от давления можно судить о полноте сгорания металла при различных давлениях. Такая зависимость определялась для составов с металлическим горючим — алюминием.

Эксперименты проводились в условиях установки постоянного давления, подробно описанной в [1], на плоских образцах размерами $10 \times 10 \times 50$ мм. Температура пламени измерялась с помощью спектрального цветового пирометра с фотоэлектрической регистрацией на базе спектрографа ИСП-51.

В каждом опыте фиксировались температурный профиль по высоте реакционной зоны газовой фазы, давление в установке и скорость горения образца. Исследовались модельные составы, отличающиеся процентным содержанием металлического горючего: 1—18% Al, 2—5% Al и 3—без металлического горючего. За температуру продуктов сгорания

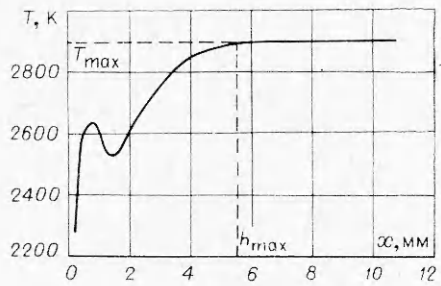


Рис. 1. Типичный температурный профиль. Состав 1, $p = 24 \cdot 10^5$ Н/м².

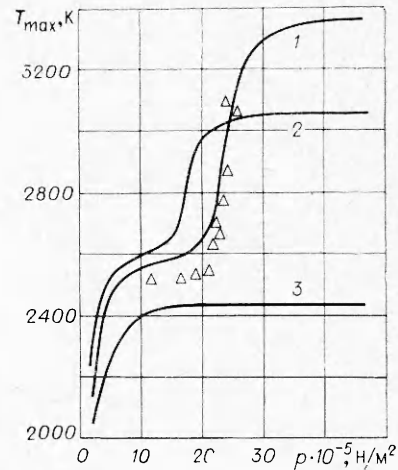


Рис. 2. Зависимость температуры продуктов сгорания от давления для составов 1—3.

принималось максимальное значение температуры (T_{\max}), фиксируемой по высоте реакционной зоны газовой фазы (рис. 1). В условиях двухфазного потока при этом регистрируется температура газовой фазы.

Опытные зависимости максимальной температуры пламени от давления приведены на рис. 2. Для всех составов характерен рост температуры с увеличением давления вплоть до значения, близкого к термодинамическому. (Расчетная температура продуктов сгорания для состава 1 равна 3450 К, для состава 2 — 3070 К и для состава 3 — 2450 К.) Присутствие в конденсированной системе горючего металла существенно деформирует зависимость $T_{\max}(p)$. Для состава 3, в котором отсутствует алюминий, имеет место резкий рост температуры при низких давлениях с постепенным выходом на постоянное значение. Уже при давлении $(10 \div 12) \cdot 10^5$ Н/м² температура достигает максимальной величины, близкой к термодинамическому значению.

Для составов с металлическим горючим на кривой $T_{\max}(p)$ существуют три характерных участка. На первом участке с увеличением давления от атмосферного до $(15 \div 20) \cdot 10^5$ Н/м² происходит непрерывный рост температуры, вначале резкий, затем более плавный. На втором участке, в пределах которого давление изменяется от $(15 \div 20) \cdot 10^5$ до $(20 \div 27) \cdot 10^5$ Н/м², температура пламени резко возрастает на несколько сот градусов. Наконец, на третьем участке температура медленно повышается до постоянной величины, близкой к расчетному значению.

Исследования показали, что такое изменение температуры пламени характерно не только для алюминизированных составов, но и для составов, в которых используется алюминий в смеси с различными соединениями других металлов. Толщина реакционной зоны в газовой фазе h_{\max} тоже зависит от давления. Причем ее изменение полностью соответствует изменению температуры от давления. В частности, на участке резкого роста температуры наблюдается существенное увеличение толщины реакционной зоны с $0,3 \div 0,5$ мм до $2,0 \div 2,5$ мм.

Таким образом, экспериментальные данные показали, что для конденсированных систем, имеющих в своем составе алюминий, существует давление, ниже которого не обеспечивается полнота сгорания металла. По аналогии с горением гомогенных конденсированных систем, у которых имеет место «критическое» давление, соответствующее максимальному тепловыделению в связи с полным раскислением окиси азота, для металлсодержащих систем отмеченное давление можно назвать

критическим по полноте сгорания металла. Для рассмотренных составов оно лежит в диапазоне $(18 \div 25) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

При давлении ниже критического основное тепловыделение в газовой фазе обеспечивается за счет химических реакций между газообразными продуктами разложения окислителя и горючего — связи. Об этом свидетельствует идентичный характер изменения температуры продуктов сгорания от давления металлсодержащих и безметалльных составов и одинаковая толщина реакционной зоны ($0,3 \div 0,5 \text{ мм}$), как и у безметалльных составов. Металл при этих условиях сгорает не полностью. Это не значит, что частицы алюминия вообще не горят. Горение металла подтверждают термодинамические расчеты, проведенные для реально получаемых при низких давлениях температур пламени. Так, для состава 1 в этих условиях сгорает 6—8% исходного металлического горючего.

При достижении критического давления интенсивность горения алюминия резко возрастает. Об этом свидетельствует рост температуры продуктов сгорания и резкое возрастание толщины реакционной зоны в газовой фазе до 2—2,5 мм, т. е. до размера, обычного для металлсодержащих составов при их полном сгорании [2]. Можно предположить, что происходящее увеличение скорости горения металлических частиц связано с изменением механизма их горения. Характерно, что резкая интенсификация процесса горения алюминия и связанное с этим резкое увеличение тепловыделения в газовой фазе происходят для составов с отличающимся процентным содержанием металла при одинаковой температуре, равной примерно 2600 К.

Зависимость температуры продуктов сгорания от давления при сгорании конденсированных систем в полузамкнутом объеме идентична полученной в установке постоянного давления. На рис. 2 точки соответствуют опытам в установке с полузамкнутым объемом. Характерно, что в этих условиях температура измерялась на значительно больших расстояниях от поверхности горения (до 100—150 мм). Следовательно, существенное увеличение времени пребывания частиц в пламени не приводит к заметному росту полноты сгорания состава. Это подтверждает, что только в условиях, соответствующих критическому давлению, возможно достижение полного сгорания металлсодержащих систем.

Эксперименты показали, что сама величина критического давления и рост максимальной температуры пламени при этом давлении зависят от процентного содержания металлического горючего: увеличение доли металла в конденсированной системе ведет к росту величины критического давления. Предварительные исследования показали также, что к росту критического давления ведут все факторы, способствующие увеличению размера металлических частиц, поставляемых в газовую фазу. Подобная зависимость указывает пути снижения величины критического давления и, следовательно, достижения полноты сгорания металлсодержащих конденсированных систем при низких давлениях.

*Поступила в редакцию
10/XI 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1.
2. П. Ф. Похил, В. М. Логачев, В. М. Мальцев. ФГВ, 1970, 6, 1.