

14. А. Е. Вол. Структура и свойства двойных металлических систем. М.: Физматгиз, 1959.
 15. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро. ФГВ, 1965, 1, 4, 24.
 16. Ю. И. Козлов, В. И. Итин. Порошковая металлургия, 1973, 6, 21.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА, РАСПЫЛЕННОГО В ДИФфуЗИОННОМ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОМ ФАКЕЛЕ

Ю. М. Аннушкин, Г. Ф. Маслов
(Москва)

1. Горение распыленного жидкого топлива в потоке газообразного окислителя (в частности, в потоке воздуха) широко применяется в различных областях техники и является, как правило, предметом экспериментальных исследований, так как методы расчета горелочных устройств в основном базируются на обобщении опытных данных.

Для обеспечения устойчивости горения распыленного жидкого топлива применяются различные способы стабилизации пламени. В частности, используется подвод энергии извне (например, истечение в камеру сгорания горящих или подогретых струй из форкамер), стабилизация горения в пограничном слое у горячих поверхностей, термическая и аэродинамическая рециркуляция и т. п. [1—3]. Стабилизаторы пламени в виде плохообтекаемых тел или горящих струй могут располагаться в потоке окислителя ниже места подачи топлива или находиться в одном и том же сечении с топливоподающим коллектором. Система, состоящая из воспламенительного устройства, стабилизатора пламени и распылителей жидкого топлива, очевидно, должна обеспечивать надежное воспламенение и устойчивое горение на всех используемых режимах при минимальной длине выгорания топлива.

Выбор типа стабилизатора пламени, например, для прямоточных камер сгорания [1] зависит от многих факторов, в том числе от вида используемого топлива. Так, например, в гиперзвуковых летательных аппаратах, где для силовой установки наиболее выгодно использовать двухкомпонентные топлива (керосин и водород) (см., например, [4]), для стабилизации пламени может быть использован газифицированный водород. В этом случае система зажигания, стабилизации и подачи

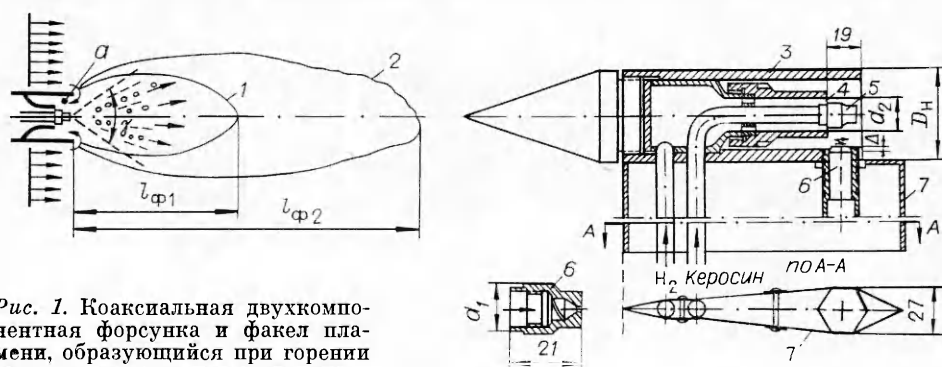


Рис. 1. Коаксиальная двухкомпонентная форсунка и факел пламени, образующийся при горении водородно-керосинового топлива.

1 — водородный диффузионный факел; 2 — водородно-керосиновый факел; 3 — стабилизатор пламени; 4 — кольцевое сопло для подачи водорода; 5 — форсунка для подачи керосина (см. схему внизу слева); 6 — электросвеча для зажигания водорода; 7 — обтекатель; $D_H = 53$ мм, $d_1 = 14$ мм, $d_2 = 20$ мм.

жидкого топлива и водорода, газифицированного в системе охлаждения, может быть выполнена в едином блоке (коллекторе).

Одной из разновидностей конструктивного исполнения элементарного односоплового блока может служить коаксиальная двухкомпонентная форсунка, показанная на рис. 1, использованная в экспериментальных исследованиях. Подача жидкого топлива и водорода, а также система зажигания и стабилизации в этой конструкции совмещены. Жидкое топливо, истекающее из центробежной форсунки со скоростью w_k , распыляется у корня водородного диффузионного факела, горящего в спутном потоке воздуха.

При наличии прикромочных уступов, как известно, диффузионное водородное пламя весьма устойчиво, т. е. горение без срыва реализуется при большой скорости спутного воздуха w_B и скорости истечения водорода w_{H_2} . После поджигания водорода (с помощью электросвечи) за соплом образуется диффузионный факел 1 длиной $l_{\phi 1}$, внутрь которого по потоку подается жидкое топливо (в данном случае — керосин). Распыленное жидкое топливо частично или полностью испаряется в высокотемпературной зоне водородного факела, длина водородно-керосинового пламени $l_{\phi 2}$ увеличивается с одновременным ростом диаметра факела.

В задачу экспериментального исследования входило определение следующих закономерностей:

изменения длины пламени водорода $l_{\phi 1}$ в спутном воздухе (без подачи керосина) при истечении водорода из кольцевого сопла двухкомпонентной форсунки;

устойчивости водородно-керосинового пламени в спутном потоке воздуха при различной величине относительной доли расхода водорода в суммарном расходе топлива: $\bar{g}_{H_2} = G_{H_2} / (G_{H_2} + G_k)$ (G_{H_2} и G_k — расходы водорода и керосина соответственно);

изменения длины водородно-керосинового пламени при различной исходной величине стабилизирующей зоны горения;

влияния относительной скорости воздуха $m_a = w_B / w_{H_2}$ на длину факела $l_{\phi 2}$ при различном составе газа в факеле.

Рассматриваемая схема горения жидкого топлива, распыленного в диффузионном водородном пламени, имеет ряд преимуществ по сравнению со схемой горения при стабилизации пламени на плохообтекаемых телах, расположенных в камере сгорания ниже топливного коллектора. К числу таких преимуществ следует отнести отсутствие стабилизаторов, а следовательно, повышенных потерь полного давления. Как показано ниже, рассматриваемая схема коаксиальной подачи топлив обеспечивает стабилизацию горения с устойчивым пламенем при скоростях воздуха существенно выше тех, которые обычно принимаются в прямоточных камерах со стабилизаторами в виде плохообтекаемых тел.

В принципе вопрос об использовании водорода для воспламенения и поддержания горения жидкого углеводородного топлива не нов. Известны случаи, когда «розжиг» камер сгорания осуществлялся с помощью водорода при подаче топлив со стенок в условиях сверхзвуковой скорости в камере и очень высокой температуры воздуха ($T_B \approx 1800$ К) [5, 6]. Однако систематических исследований совместного горения жидкого углеводородного топлива и газообразного водорода недостаточно, особенно в рассматриваемой схеме коаксиальных потоков.

Методика экспериментального исследования

Для выяснения указанных выше закономерностей использовалась комбинированная коаксиальная форсунка (см. рис. 1), размещавшаяся в воздушном потоке по центру дозвуковой аэродинамической трубы диа-

метром 160 мм. Конструкция коаксиальной форсунки предусматривала осесимметричный обтекатель, который являлся одновременно и стабилизатором водородного пламени.

В зоне рециркуляции (см. рис. 1, а) находился плоский торец электросвечи СПН-4-3Т для воспламенения водорода. После воспламенения водорода подавался керосин. Истечение топлив (водорода и керосина) происходило в атмосферу с нормальным давлением ($p \approx 100$ кПа). Температура топлив и спутного воздуха составляла примерно 300 К. Расход керосина через центробежную центральную форсунку мог изменяться от нуля до 8 г/с при перепаде давления $\Delta p = (0 \div 15) \cdot 10^2$ кПа и скорости истечения $w_k = 0 \div 60$ м/с. Предварительная проливка и тарировка керосиновой форсунки показала, что угол распыла топлива изменялся от $\gamma = 58^\circ$ (при $\Delta p = 1,2 \cdot 10^2$ кПа) до $\gamma = 70^\circ$ (при $\Delta p \geq 6 \cdot 10^2$ кПа). Коэффициент расхода керосиновой форсунки составлял примерно 0,33 при $\Delta p = (4 \div 15) \cdot 10^2$ кПа.

Эксперименты проводились в следующей последовательности. Устанавливалась необходимая скорость воздуха ($w_a = 0 \div 150$ м/с), затем подавался водород, который воспламенялся от электросвечи. В образовавшийся водородный диффузионный факел подавался керосин. Его расход варьировался в диапазоне $g_k = 1 - g_{H_2} = 0 \div 1$.

Предварительная отработка системы воспламенения водорода показала, что надежное его зажигание при $w_a < 150$ м/с и $w_{H_2} < 500$ м/с происходит лишь при малом вылете торца свечи в зону рециркуляции ($\Delta = 0,5 \div 1$ мм). С увеличением Δ зажигание ухудшается, при $\Delta = 6$ мм (поверхность свечи находится у внешней стенки водородного кольцевого сопла) воспламенение водорода происходило лишь при $w_a = 0$ (затопленный факел).

Все эксперименты проводились с зажиганием водорода при вылете торца электросвечи $\Delta = 0,5$ мм.

Результаты исследования

Водородное пламя ($\bar{g}_{H_2} = 1$). Закономерности изменения длины диффузионного водородного факела, развивающегося в спутном потоке воздуха при истечении водорода из кольцевого сопла ($h/d_1 \approx 0,2$), необходимы для выбора размера сопла ($h = (d_2 - d_1)/2$) и режима работы (w_{H_2} , w_a), которые бы обеспечивали достаточную длину высокотемпературной области горения водорода $l_{\phi 1} = \bar{l}_{\phi 1} h$, необходимую для испарения и сгорания жидкого топлива. Полученные ранее [7] закономерности изменения длины пламени при истечении водорода из осесимметричного и плоского пристеночного сопла неприменимы для щелевого кольцевого сопла.

Результаты исследования изменения относительной длины водородного пламени при истечении из кольцевого сопла и сравнение относительных длин пламени при истечении водорода из трех видов сопел показаны на рис. 2. Так же, как и в случаях истечения из осесимметричных и плоских сопел [7], при наличии обширных зон рециркуляции у кольцевого сопла с увеличением m_2 ($m_a = w_a/w_{H_2}$) длина пламени монотонно уменьшается. Опытные данные обобщаются при $\bar{\rho}_a = \rho_a/\rho_{H_2} = 14,5 = \text{const}$, $h/d_1 = \text{const}$ и различных w_a и w_{H_2} единой кривой рис. 2, 2. Как и ожидалось, обобщенная кривая $l_{\phi 1}(m_a)$ для кольцевого сопла находится между обобщенными кривыми для круглого и плоского сопла.

Из анализа фотографий пламен следует, что водород втягивается в зону рециркуляции, горение происходит по всему сечению среза двухкомпонентной форсунки с диаметром зоны стабилизации D_n . Из-за наличия прикромочной зоны рециркуляции, в которой также происходит

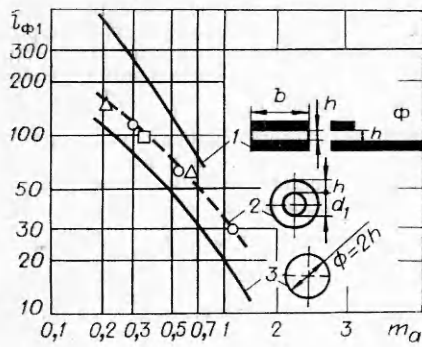


Рис. 2. Закономерности изменения длины водородного пламени в спутном потоке воздуха.

1 — плоское сопло ($b/h \approx 28 \div 76$); 2 — кольцевое; 3 — круглое. \square — $w_B = 50$ м/с; Δ — $w_B = 100$ м/с; \circ — $w_B = 150$ м/с.

горение, факел кажется суживающимся (хотя, как известно, при истечении из сопла без кромок его диаметр сначала увеличивается, а затем убывает до нуля).

Используя закономерности, показанные на рис. 2, при проектировании горелочного устройства можно выбрать такое сочетание параметров h , w_B , w_{H_2} , которое обеспечивает необходимую длину стабилизирующего водородного пламени.

Длина факела $l_{\Phi 1}$ и скорость движения мелких капель (приблизительно равная скорости воздушного потока, $w - w_B$) в первую очередь определяют время пребывания капель жидкого топлива в высокотемпературной зоне ($\tau_{пр} \sim l_{\Phi 1}/w_B$), которое для полного сгорания в водородном факеле должно быть больше времени испарения капель жидкого топлива (при $T_r^* = 1800 \div 2000$ К).

Водородно-керосиновое пламя ($0 < \bar{g}_{H_2} < 1$). Устойчивость водородно-керосинового пламени определяется многими параметрами. В частности, при фиксированной схеме комбинированной форсунки и постоянных T_B^* , $T_{H_2}^*$, T_r максимально допустимая скорость спутного потока (скорость воздуха, при которой происходит погасание факела) $w_{B \max}$ определяется относительной долей водорода \bar{g}_{H_2} в общем расходе топлива.

Без водорода ($\bar{g}_{H_2} = 0$) скорость воздуха, соответствующая срыву пламени, составляет 40–50 м/с (рис. 3) и находится на уровне обычно реализуемой скорости воздуха перед топливным коллектором в прямоточ-

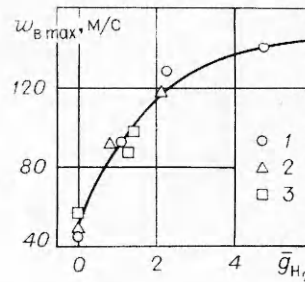


Рис. 3. Зависимость скорости воздуха, соответствующей срыву пламени, от относительной доли водорода в керосин-воздушном топливе; $T_{H_2}^* = T_K = T_B^* = 300$ К, $p_B = 100$ кПа.

1 — $G_K \approx 2,2$ г/с, $\Delta p = 100$ кПа, $w_K = 16$ м/с; 2 — $G_K \approx 4$ г/с, $\Delta p = 350$ кПа, $w_K = 32$ м/с; 3 — $G_K \approx 7,7$ г/с, $\Delta p = 1400$ кПа, $w_K = 60$ м/с.

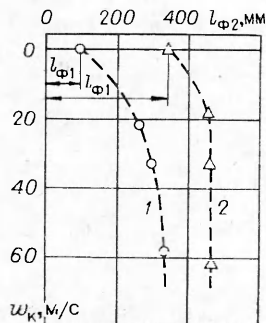


Рис. 4. Зависимость длины пламени от скорости подачи керосина (и его расхода) в водородно-воздушный факел; $w_B = 150$ м/с. w_{H_2} , м/с: 1 — 137, 2 — 490.

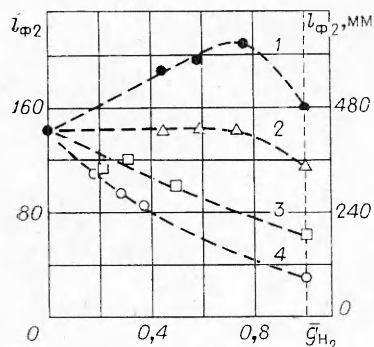


Рис. 5. Изменение длины пламени при горении в спутном потоке воздуха водородно-керосинового двухкомпонентного топлива при различном относительном массовом расходе водорода; $T_K = T_{H_2} = T_B^* = 300\text{K}$.

Диаметр выходного сечения керосиновой форсунки 0,8 мм, высота кольцевого водородного сопла $h = 3$ мм, $h/d_1 = 3/14$.

1 — $w_B = 97\text{м/с}$, $w_{H_2} = 470\text{м/с}$,

$m_a = 0,203$; 2 — $w_B = 150\text{м/с}$, $w_{H_2} = 490\text{м/с}$,

$m_a = 0,305$; 3 — $w_B = 97\text{м/с}$, $w_{H_2} = 154\text{м/с}$,

$m_a = 0,63$; 4 — $w_B = 150\text{м/с}$, $w_{H_2} = 132\text{м/с}$,

$m_a = 1,13$.

ных камерах сгорания со стабилизацией пламени на плохообтекаемых телах. С увеличением \bar{g}_{H_2} устойчивость пламени сильно увеличивается. Столь сильное увеличение устойчивости пламени с ростом \bar{g}_{H_2} позволит, очевидно, увеличить и скорость воздуха перед коллекторами, что может привести к сокращению площади поперечного сечения воздушных каналов при использовании совмещенных коллекторов для комбинированного водородно-керосинового топлива.

Длина водородно-керосинового пламени $l_{\phi 2}$, в некоторой степени (как и водородного) характеризующая длину выгорания топлива, при малом $l_{\phi 1}$ увеличивается с ростом относительной доли керосина (рис. 4), а в случае большой величины $l_{\phi 1}$ выходит на предел или имеет экстремум (рис. 5)¹.

В опытах с $w_{H_2} = 132$ и 490 м/с даже в случае очень большой скорости воздуха ($w_B = 150$ м/с) при $h = 3$ мм за соплом реализуется факел пламени, близкий по виду к диффузионному факелу газообразного топлива. При изменении \bar{g}_{H_2} изменяются параметры в начале факела (плотность, стехиометрический коэффициент смеси топлива и т. п.), поэтому даже приближенный расчет такого факела затруднителен. Полученные экспериментальные закономерности (см. рис. 5) дают возможность использования опытных данных для расчета конструкций камер сгорания.

Итак, полученные экспериментальные закономерности свидетельствуют о том, что рассматриваемая схема сгорания жидкого топлива в потоке водородно-воздушного факела имеет достаточно хорошие характеристики устойчивости пламени даже при малой доле водорода в водородно-керосиновом топливе ($\bar{g}_K = 1 \div 2\%$) и умеренные длины пламени.

Поступила в редакцию
26/V 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Ильяшенко, А. В. Галантов. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964.
2. Вопросы зажигания и стабилизации пламени/Под ред. С. А. Гольденберга. М.: ИЛ, 1963.
3. Теория воздушно-реактивных двигателей/Под ред. С. М. Шляхтенко. М.: Машиностроение, 1975.
4. J. P. Weidner. J. Aircraft, 1978, 5, 10.
5. J. J. Isaacs, R. A. Cookson. AIAA J., 1973, 11, 7.
6. R. A. Cookson, J. I. Isaacs. AIAA-Paper, N 74-1160, 1974.
7. Ю. М. Аннушкин, Г. Ф. Маслов. ФГВ, 1980, 16, 1, 26.

¹ При малых m_a и $h = \text{const}$ реализуется большая длина пламени $l_{\phi 1}$ (см. рис. 2).