

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Гуссак.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
2. Е. С. Щетников. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
3. Н. Phillips. Comb. Flame, 1972, 19, 2, 187.
4. В. Н. Груздев, Ю. В. Виноградов и др. Горение в потоке. Тр. КАИ. Казань, 1974.
5. Л. А. Гуссак, О. Б. Рябиков и др. Докл. АН СССР, 1973, 208, 5, 1126.
6. L. A. Gussak, M. G. Turkish. Stratified Charge Engine Conference. The Institute of Mechanical Engineers. London, 1976.
7. Н. Н. Семенов. Докл. АН СССР, 1944, 43, 8, 360.
8. J. R. Creighton. A Critique of the Theory for Gussak's "LAG-Process" Engine. SAE Paper N 790249, 1979.
9. А. Е. Вишневский, В. П. Богославский, И. Б. Самойлов. Изв. АН СССР. Сер. химическая, 1976, 4, 749.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВ ВО ВСТРЕЧНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Ю. М. Аннушкин, А. Н. Князев, Н. С. Лошенкова
(Москва)

Для летательных аппаратов различного назначения с воздушно-реактивными двигателями (ВРД) наряду с применяемыми в настоящее время углеводородными топливами [1, 2] рассматривается возможность перспективного использования (в прямоточных и форсажных камерах сгорания) высокоэнергетических синтетических углеводородных топлив с повышенной плотностью [3, 4], бороводородных топлив (типа пентаборана), а также бороуглеводородных топлив [5] в виде химических (синтезированных) соединений типа алкилированных боралов [6] (например, триэтилбор [7, 8], этилдекаборан — топливо Д-3) или смесей высокоэнергетических тяжелых углеводородов с бороводородными топливами. Смесей бороводорода с тяжелыми углеводородами широко исследуются в Лаборатории прикладной физики США [9].

Закономерности горения и организации рабочего процесса в прямоточных и форсажных камерах сгорания при использовании жидких углеводородных топлив изучены в достаточной для практики степени [10, 11], тогда как рабочий процесс в камерах сгорания, работающих на борсодержащих топливах (механизм горения которых отличен от механизма горения углеводородных топлив), изучен недостаточно. Слабо исследовано, в частности, горение распыленного борсодержащего топлива во встречном, сносном и спутном высокотемпературных воздушных потоках, когда температура воздуха превышает температуру термического разложения топлива ($T_B^* > 680\text{ K}$).

В задачу настоящей работы входило экспериментальное определение геометрических характеристик зон испарения и горения распыленного во встречном потоке воздуха бороуглеводородного топлива и сравнение их с аналогичными характеристиками углеводородного топлива и газобразного водорода. В опытах использовалась одна конструкция прямоточной форсунки, параметры набегающего воздуха (скорость, давление, температура) сохранялись примерно одинаковыми.

Предварительный этап исследования, проведенный с подачей топлив в спутный, сносный и встречный потоки воздуха, показал, что устойчивое горение исследуемых жидких топлив при $T_B^* = 700\text{ K}$ и скорости воздуха $w_\infty \sim 31\text{ м/с}$ при выбранной схеме форсунки оказалось возможным лишь в случае встречной подачи топлива. Эта схема и принята для дальнейшего исследования.

Экспериментальная установка состояла из сужающегося аэродинамического сопла с диаметром 160 мм, топливных систем жидкости и газа и систем измерения. В рабочей части аэродинамического сопла (в потен-

циальном ядре потока) на расстоянии 150 мм от среза устанавливалась струйная топливная форсунка с диаметром сопла $d_c = 1$ мм. Пламя стабилизировалось установкой на форсунке в 50 мм от среза сопла шайбы диаметром 35 мм. Жидкое топливо подавалось к форсунке по стендовой системе посредством вытеснения его азотом из бака. Для зажигания топлива использовалась электросвеча (выдвижные электроды) с напряжением на клеммах $U = 6$ кВ.

Воздух подогревался до необходимой температуры $T_B^* = 750$ К в электроподогревателе, температура топлива в баке была равна окружающей температуре $(5-20)^\circ\text{C}$. Статическое давление в окружающей среде составляло ~ 100 кПа.

При постоянной скорости воздуха ($w_B \approx 31$ м/с) изменением давления вытеснения достигалось изменение скорости истечения топлива ($w_T = 4 \div 15$ м/с) и отношение скоростных напоров топлива к воздуху ($\bar{q}_T = q_T/q_B = 0 \div 50$).

В эксперименте фотографированием факелов распыла и горения определялись их характеристики (рис. 1): дальнобойность топливной струи (l_1), максимальный диаметр факела распыла (D_1), расстояние среза сопла форсунки до начала (l_2) и конца (l_3) факела горения или до конца вынужденного (l_3), длина $l_\Phi = (l_3 - l_2)$ и ширина (D_Φ) факела пламени.

Максимальная длина пути жидких частиц (капель) при движении во встречном потоке и длине зоны испарения $l = |l_1| + |l'_3|$ принималась равной $2l_1 + l'_3$, а время испарения оценивалось по приближенной зависимости: $\tau_{\text{исп}} = \frac{2l_1}{w_T} + \frac{2(l_1 + l'_3)}{w_B}$, где первое слагаемое характеризует время движения капель против потока воздуха со средней скоростью $w = w_T/2$, а второе — время движения испаряющихся капель топлива в спутном воздушном потоке со средней скоростью $w = w_B/2$.

Теплопроизводительность форсунки Q_1 определялась как произведение расхода топлива на его массовую теплотворную способность.

Методика эксперимента. Воздух с заданными параметрами поступал в сопло. Навстречу воздушному потоку подавалось (с варьируемой скоростью) жидкое топливо или газообразный водород. Топливная струя до

зажигания фотографировалась фотоаппаратом АНФ-21М, работавшим синхронно с измерительной аппаратурой. Топливо зажигалось электро-разрядником, после чего он выводился из зоны горения (и рабочей зоны). Далее производилась фотосъемка факела пламени, после чего подача топлива прекращалась.

На стенках форсунки и перед стабилизатором при горении бороудородного топлива наблюдалось налипание горячих шлаков, что свойственно бороуглеводородному топливу, продукты сгорания которого содержат вязкие твердо-жидкие элементы. Они, по-видимому, при непрерывной работе являлись дополнительными стабилизаторами.

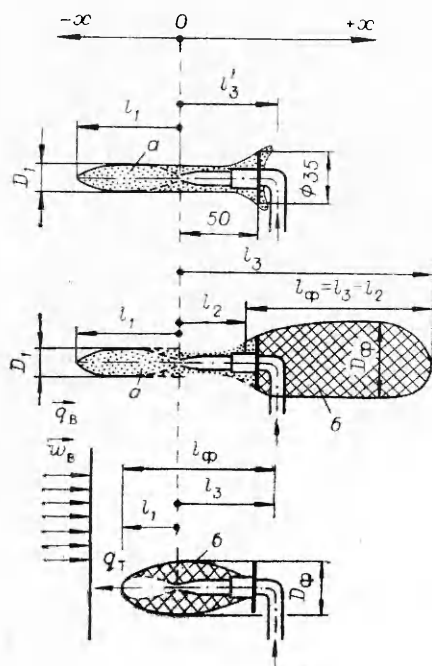


Рис. 1. Схема факелов распыления и горения.

I — факел распыла и испарения жидкого топлива (без горения); II — факел горения жидкого топлива; III — факел горения газообразного водорода; а — зона распыла и испарения; б — факел пламени.

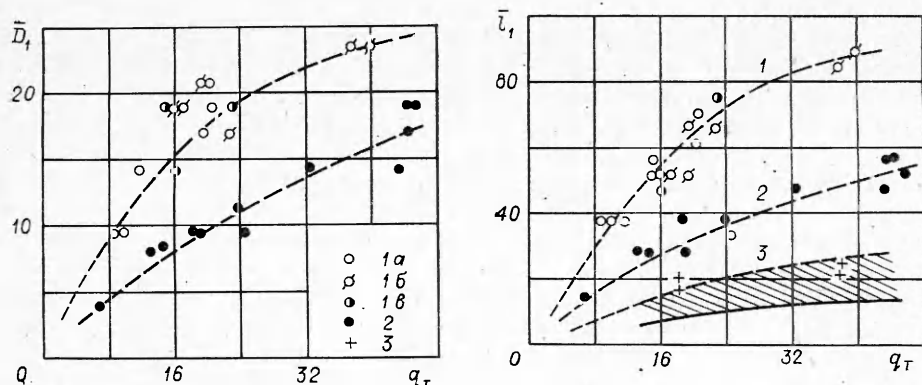


Рис. 2. Зависимость геометрических характеристик факела распыла и испарения от относительного скоростного напора топлива.

1 — углеводородное топливо: 1а — $T_B^* = (652 \div 730)$ К без горения, 1б — $T_B^* = (583 \div 730)$ К без горения, 1с — $T_B^* = (720 \div 730)$ К с горением; 2 — бороуглеводородное топливо, $T_B^* = (676 \div 720)$ К без горения; 3 — водород, $T_B^* = (644 \div 646)$ К.

Результаты экспериментальных исследований. В соответствии с теоретическими соотношениями [10—12] качество распыления и скорость испарения распыленной в потоке газа жидкой струи определяются геометрическими характеристиками форсунки, отношением скоростных напоров и физическими свойствами жидкости и газа. Следовало ожидать, что при одинаковых скоростных напорах бороуглеводородное топливо, более вязкое и плотное в сравнении с углеводородным и имеющее примерно в 1,5 раза больший коэффициент поверхностного натяжения и более низкое давление насыщенных паров, будет хуже распыляться и медленнее испаряться. В частности, ожидалось, что струя бороудержащего топлива будет иметь большую длину выброса l_1 .

Эксперимент же показал обратное: дальнобойность l_1 и диаметр струи D_1 бороудержащего топлива оказались примерно в 2 раза меньше, чем углеводородного, и в полтора раза больше, чем водорода (рис. 2). Следовательно, испарение бороуглеводородной струи во встречном высокотемпературном потоке воздуха происходило примерно вдвое быстрее, чем углеводородной (при $\bar{q}_T = 16 \div 50$ для бороудородного топлива $\tau_{исп} = 8 \div 12$ мс, а углеводородного 15—16 мс).

Существенное уменьшение l_1 и D_1 факела распыла бороудержащего топлива при $\bar{q}_T = \text{idem}$ можно предположительно объяснить ускоренной потерей кинетической энергии при термическом разложении распыленного топлива в высокотемпературном встречном потоке воздуха на мелкодисперсный бор и водород (так как $\bar{l}_1$ находится между водородом и углеводородным топливом, см. рис. 2).

Как показал анализ (рис. 3), при одинаковой теплопроизводительности

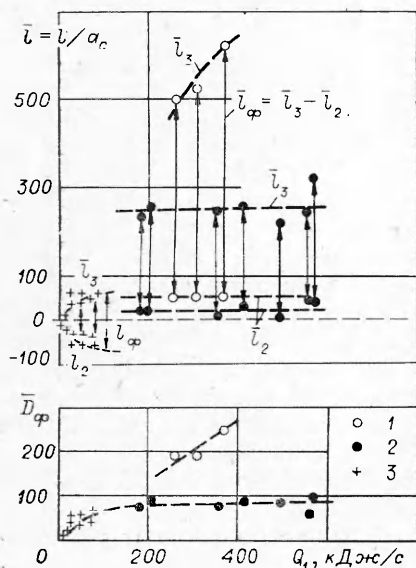


Рис. 3. Зависимость геометрических характеристик факела горения углеводородного, бороуглеводородного топлива и газообразного водорода от теплопроизводительности форсунки; $w_T \approx 31$ м/с, $p_B \approx 100$ кПа.

1 — углеводородное топливо, $T_B^* = (720 \div 730)$ К;
2 — бороуглеводородное топливо, $T_B^* = (676 \div 720)$ К;
3 — водород, $T_B^* = (644 \div 646)$ К.

форсунки (в условиях $T_v^* = \text{idem}$, $w_v = \text{idem}$) факел пламени борсодержащего топлива примерно в 2 раза короче и меньшего диаметра, чем углеводородного, причем с ростом Q_1 величины l_3 , l_ϕ и D_ϕ углеводородного топлива возрастают, а бороуглеводородного (как и водорода при диффузионном горении турбулентной струи) остаются примерно постоянными.

Итак, сильно различающиеся закономерности изменения геометрических характеристик факелов горения бороуглеводородного и углеводородного топлив во встречном высокотемпературном воздушном потоке свидетельствуют, по-видимому, о различающихся механизмах горения этих топлив, на что следует обратить внимание исследователей, занимающихся теоретическими методами расчета рабочего процесса в камерах сгорания, работающих на бороуглеводородных топливах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975.
2. E. A. Clifford Simpson. *Astronautics and Aeronautics*, 1974, 12, 9.
3. G. W. Burdette, H. R. Lander, J. R. Mc Coy. *AIAA Paper*, 1978, N 78—267.
4. R. B. Forrar. *AIAA Paper*, 1968, № 68—632.
5. F. Fitzgerald. *Spaceflight*, 1961, 3, 6.
6. J. L. Hunt, P. L. Lawing et al. *J. Aircraft*, 1979, 16, 10.
7. *Aviation Week*, 1959, 70, 21, 85—86; *SAE J.*, 1959, 67, 5, 70—74.
8. R. P. Reul. *Missiles Design and Development*, 1959, 5, 9.
9. E. T. Curran, F. D. Stull. Paper presented at the 2-nd International Symposium on Air Breathing Engines. Sheffield, 1974.
10. Б. В. Раушенбах, С. П. Белый и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964.
11. С. М. Ильяшенко, А. Г. Талантов. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964.
12. М. М. Бондарюк, С. М. Ильяшенко. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. М.: Оборонгиз, 1958.

О ВЛИЯНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В. Б. Либрович, А. Л. Ярин

(Москва)

Из экспериментов известно, что скорость стационарного горения смесевых твердых ракетных топлив зависит от напряженного состояния в них. Растянутые вдоль поверхности горения образцы горят быстрее. Относительное увеличение скорости горения зависит от относительного удлинения образца ϵ по линейному закону; при 10%-ном удлинении скорость также увеличивается на 10%. Подобное явление указывает на существенную роль процессов в конденсированной фазе горения: диспергирования в результате аэродинамического отрыва твердых частиц с поверхности топлива оттекающими продуктами газификации, растрескивания поверхностного слоя под действием растягивающих напряжений [1].

Механизм влияния растяжения топлива на скорость его горения представляется следующим. Образование новых трещин при растяжении способствует выходу продуктов газификации из пористого поверхностного слоя, где они образуются в объемной химической реакции. Тем самым уменьшается разрушающее действие газового потока — уменьшается диспергирование топлива, вынос твердых частиц в газовую фазу. Этот эффект, казалось бы, должен вести к уменьшению скорости горения при растяжении образца. Но существует и противоположный эффект: увеличение количества реакционноспособного вещества в прогретом слое ведет к дополнительному выделению тепла в конденсированной фазе, увеличению температуры и, следовательно, к увеличению скорости химического превращения. При сильной зависимости скорости газификации от температуры (что обычно имеет место) этот эффект является преобладающим и определяет наблюдаемые в эксперименте закономерности.

Трещины в приповерхностном слое твердых топлив имеют упорядоченную структуру. При отсутствии внешнего напряжения они направле-