

потери устойчивости. Из сопоставления рис. 4, а, б следует, что описанное явление допускает трактовку в качестве следствия воспламенения зоны обратных токов на стационарном режиме камеры сгорания в результате естественных флуктуаций процесса горения в основном потоке.

Проведенный анализ показывает, что описанная в работе [5] бифуркация, приводящая к изменению пространственной структуры зоны горения в камерах сгорания, выполненных по схеме газ — жидкость, имеет место и при горении предварительно перемешанных газов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Неустойчивость** горения в ЖРД/Под ред. Д. Т. Харье, Ф. Г. Рирдопа.— М.: Мир, 1975.— 872 с.
2. **Натанзон М. С.** Неустойчивость горения.— М.: Машиностроение, 1986.— 248 с.
3. **Зельдович Я. Б., Воеводский В. В.** Тепловой взрыв и распространение пламени в газах.— М.: ММИ, 1947.— Ч. I.— 294 с.
4. **Вулис Л. А.** Тепловой режим горения.— М.: ГЭИ, 1954.— 288 с.
5. **Дубинкин Б. Н., Натанзон М. С., Чамьян А. Э.** О двух режимах горения в камере сгорания с зоной рециркуляции // ФГВ.— 1978.— 14. № 6.— С. 3—41.
6. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов.— М.: Наука, 1965.— 740 с.
7. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй.— М.: Физматгиз, 1960.— 716 с.
8. **Меркулов И. В., Меньшикова О. М., Лапина З. С.** Численная модель процесса вибратционного горения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1990.— № 5.— С. 140—148.
9. **Habiballah M., Lourme D., Pit F.** A Comprehensive model for combustion stability studies applied to the ariane viking engine // AIAA Paper.— 1988.— N 86.— P. 1—7.
10. **Натанзон М. С.** Амплитудно-фазовый метод исследования вибратционного горения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1981.— № 5.— С. 138—146.
11. **Натанзон М. С.** Матрицы частотных характеристик процесса горения // Там же.— 1983.— № 2.— С. 110—119.
12. **Натанзон М. С., Лапина З. С., Меркулов И. В.** Устойчивость горения в камере сгорания // Там же.— 1985.— № 4.— С. 137—146.

г. Москва

Поступила в редакцию 6/III 1991,  
после доработки — 29/V 1991

УДК 536.46 : 621.45.022

*В. А. Виноградов, С. А. Кобыжский, М. Д. Петров*

#### ОРГАНИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В МОДЕЛЬНОМ ГПВРД

Приведены результаты экспериментов по организации горения керосина в плоской модели гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя в условиях внешнего обдува потоком с параметрами:  $M_\infty = 6$ ,  $p_\infty^* = (53 \div 55) \cdot 10^5$  Па,  $T_\infty^* = 1500$  К. Изучена работа нескольких вариантов прямоугольной камеры сгорания с различными инжекторами керосина и стабилизирующими элементами при использовании водорода в качестве поджигающего топлива. Определены условия, при которых керосин горит в каналах постоянной площади с углами расширения 2 и 8° после отключения водорода.

Организовать горение керосина в гиперзвуковом прямоточном воздушно-реактивном двигателе (ГПВРД) со сверхзвуковым потоком в канале сложно из-за больших времен задержки воспламенения и реакции этого топлива, вследствие чего в канале необходимо устанавливать дополнительные поджигающие и стабилизирующие горение элементы (например, топливные форсунки дежурного факела с достаточно высокой концентрацией активных частиц или нишевые углубления на стенках, создающих локальные рециркуляционные зоны).

Воспламенение керосина и стабилизацию горения в ГПВРД лимитирует процесс смешения, которое в данном случае может существенно улучшить система скачков уплотнения, связанная с особенностями геометрии канала и волной горения (в [1] волна горения за уступом камеры

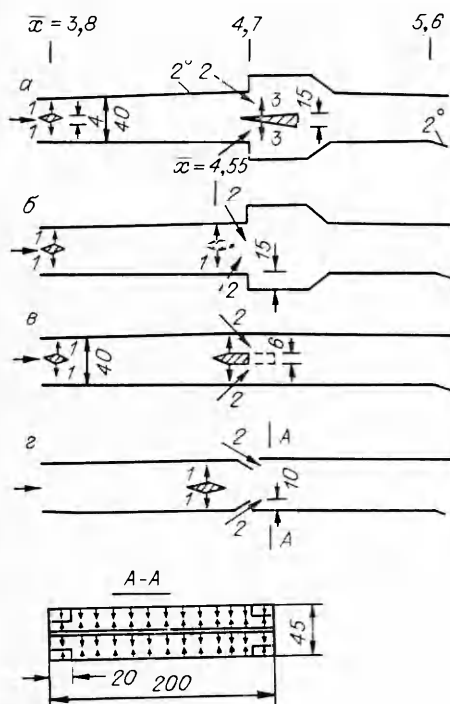


Рис. 1. Конфигурация камеры сгорания с однополюсным инжектором керосина.  
1 — керосин; 2, 3 — водород.

питировалась дросселированием струями фреона). В качестве топлива высокой реакционной способности обычно используют фтор, силан или смеси, компонентами которых они являются, однако успешно можно вводить водород. В [2] горение керосина, подаваемого со стенок камеры сгорания перпендикулярно сверхзвуковому потоку с числом Маха  $M = 2$ , поддерживалось небольшим количеством водорода, поступающего также со стенок камеры через другой пояс отверстий. Если же в этой камере использовался в качестве стабилизатора уступ, то за ним для поддержания горения керосина требовалось подавать больше водорода. В [3] также применялся водород для иницирования горения с последующим прекращением его подачи для поджигания углеводородного горючего — этилена и керосина.

Цель настоящей работы — поиск путей организации горения керосина в ГПВРД с другими стабилизирующими элементами при использовании водорода в качестве воспламеняющего топлива. Инжекцию керосина в поток предполагалось производить через одиночный пилон, располагаемый в центре канала. Поставлена также задача определить условия, при которых после воспламенения керосина вспомогательное топливо можно было бы отключать.

1. Экспериментальный стенд обеспечивал следующие параметры торможения потока:  $p_{\infty}^* = (53 \div 55) \cdot 10^5$  Па,  $T_{\infty}^* = 1500$  К,  $M_{\infty} = 6$ . В стендовом подогревателе воздуха сжигался керосин, при этом содержание кислорода на выходе поддерживалось постоянным. Модель ГПВРД размещалась в сопле стенда диаметром 400 мм так, что на входе в модель было расчетное течение. Стендовые системы запускались программным устройством. Общая продолжительность эксперимента составляла 30 с. Топливо в модель подавалось после установления давления торможения. Измерительный комплекс состоял из датчиков давления ДДМ и ПКД.

2\*

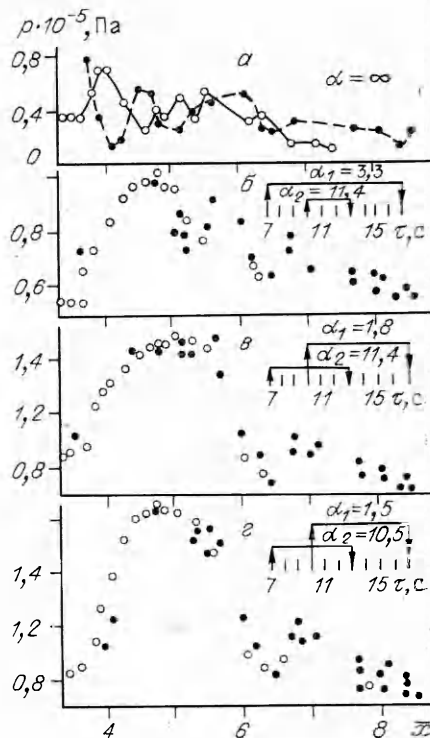


Рис. 2. Распределение статического давления вдоль канала камеры сгорания с однополюсным инжектором керосина и нишевыми стабилизаторами.

а — схема рис. 1, а, б без пилонов; б, в — рис. 1, б с инжектором в сечении  $\bar{x} = 3,8$ ,  $\tau = 16$  с; г — рис. 1, б с инжектором в сечении  $\bar{x} = 4,55$ ,  $\tau = 16$  с.

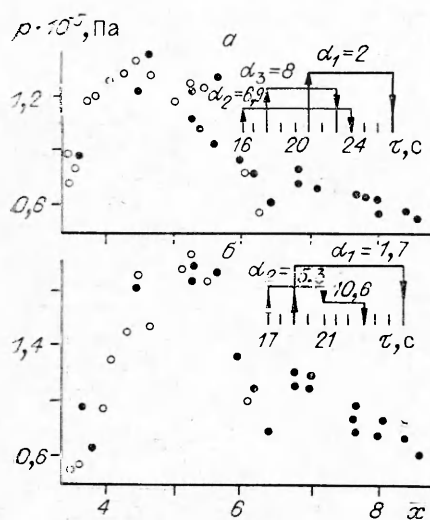


Рис. 3. Распределение статического давления вдоль канала камеры сгорания с однопоясным инжектором керосина и пилоном-стабилизатором (а) или с пластинчатыми стабилизаторами в углах канала (б).

а — схема рис. 1,  $\alpha_1 = 13,5$  с;  $\tau = 26$  с.  
б — рис. 1,  $\alpha_1 = 13,3$  с;  $\tau = 26$  с.

хромель-алюмелевых и хромель-копелевых термопар и расходомеров ТДР. Их показания записывались и обрабатывались на ПЭВМ. Проводилась съемка теневой картины обтекания прибором ИАБ-451.

Модель ГПВРД с площадью входа  $200 \times 200$  мм и выхода  $66 \times 200$  мм состояла из воздухозаборника и прямоугольной камеры сгорания. Воздухозаборник — трехскачковый, перегулируемый, с площадью горла  $40 \times 200$  мм. За горлом располагалась неохлаждаемая камера сгорания (рис. 1). Начальный участок камеры со стороны обечайки имел расширение  $2^\circ$ , которое заканчивалось в сечении  $\bar{x} = 4,7$ . Координата  $\bar{x} = x/h_{\text{вх}}$  отсчитывалась от начала воздухозаборника. На участке  $\bar{x} = 4,7 \div 5,6$  располагались нишевые стабилизаторы, закрывающиеся в случае использования других стабилизирующих элементов. Перед нишами устроен пояс пристеночной подачи водорода 2, состоящий из 14 отверстий с каждой стороны канала. За сечением  $\bar{x} = 5,6$  на центральном теле канала расширялся с углом  $2^\circ$  во всех экспериментах с однопоясным инжектором керосина. На боковых стенках камеры имелись лючки, на крышках которых устанавливались разные инжекторы в том или другом сечении.

Однопоясной инжектор керосина — это сварная конструкция с миделевым размером 4 мм. В трубке просверлены 20 или 28 отверстий диаметром соответственно 0,5 и 0,3 мм так, что керосин подавался перпендикулярно к направлению потока. При этом давление подачи керосина было таким, что обеспечивалась дальнобойность струй  $\sim 10$  мм.

2. На рис. 1 представлены последовательно изученные конфигурации камеры сгорания с различными стабилизирующими элементами и однопоясным инжектором керосина, а на рис. 2 и 3 распределения статического давления  $p$  вдоль канала на стационарном режиме. Распределение  $p(\bar{x})$  для исходной конфигурации (рис. 1, а, б, с нишами, но без пилонов) на участке воздухозаборника достаточно хорошо совпадало с расчетом, на остальных же участках канала имелось качественное соответствие. Водород 2, подаваемый в канале исходной конфигурации перед нишами с расходом, соответствующим коэффициенту избытка воздуха  $\alpha = 10$ , самовоспламенялся и устойчиво горел, при этом за нишами давление увеличивалось на 10—20 %.

Пилон-стабилизатор в схеме рис. 1, а после подачи из него водорода 3 с  $\alpha = 5$  разрушался, однако при этом донный участок был в хорошем состоянии. После уменьшения вдвое расхода водорода и сокращения времени его подачи до 3 с пилон-стабилизатор оставался целым. Горение водорода 3 предположительно стабилизировалось на струях, а не за торцом, так как за отверстиями подачи на обтекаемых поверхностях пилонных местами были видны следы расплавленного припоя швов конструкции, а донная поверхность не изменялась. В этой конструкции керосин горел, поскольку давление в канале всюду увеличилось, хотя и не так значительно, как ожидалось (например, за нишами всего на 50 %). Относительно большой поперечный размер пилон-стабилизатора (15 мм) приводил к значительному локальному повышению давления в нишах вблизи сечения  $\bar{x} = 4,9$  до  $1,2 \cdot 10^5$  Па.

Результаты экспериментов с камерой сгорания, в которой поджигание и стабилизация горения керосина, подаваемого из однополюсного инжектора, осуществлялись продуктами сгорания водорода 2 в нишах, приведены на рис. 2, б — г. Анализ осциллограмм температур поверхности и давлений в канале показал, что керосин до подачи водорода 2 не самовоспламенялся и только ввод водорода, даже с малым расходом ( $\alpha = 10$ ), приводил к его воспламенению. После отключения водорода 2 горение керосина с  $\alpha = 3,3 \div 1,5$  не прекращалось и было устойчивым (см. рис. 2, б, в).

На входе в модель расчетное течение нарушалось: при  $\alpha_1 \approx 3,3$  вблизи клина обечайки вместо присоединенного наблюдался отошедший скачок уплотнения, а при  $\alpha_1 = 1,5$  это явление усиливалось, так что коэффициент расхода воздухозаборника уменьшался на 10—15%. Керосин горел и после переноса инжектора ближе к нишевому стабилизатору (см. рис. 1, б, 2, г), в сечение, находящееся на расстоянии 30 мм вверх по потоку от начала ниши. Попытки организации горения керосина при  $\alpha_1 \gg 3$  неудачны: если даже в начальный момент керосин воспламенялся, стабилизировать горение не удавалось.

Наличие отошедшего скачка уплотнения вблизи обечайки показало, что была достигнута предельная величина теплоподвода, т. е. керосин горел при наличии системы волн псевдоскачка в камере сгорания. Модель этого волнового процесса горения можно представить в следующем виде. Продукты сгорания водорода в нишах, образующие контактную поверхность активных частиц, поджигают струи керосина. Если при этом теплоподвод достигает предельной величины, то в канале устанавливается система волн псевдоскачка, в которой капли керосина дробятся, испаряются и смешиваются с воздухом с высокой эффективностью. В результате часть керосина, пройдя сравнительно короткий путь, попадает в ниши и сгорает в них даже после отключения водорода. Продукты сгорания в нишах поджигают струи керосина в ядре потока, т. е. горение керосина самостабилизируется.

Внутренняя контактная поверхность продуктов сгорания водорода образуется горящими струями с пилон-стабилизатора в схеме рис. 1, а. Изучена работа камеры сгорания со стабилизатором-пилоном меньшего размера (6 мм), в которой внешняя контактная поверхность создавалась горением пристеночных струй водорода 2 при закрытых нишах (см. рис. 1, в). Предполагалось, что в этом случае наличие скачков уплотнения на пилоне, приводящее к локальному повышению давления на стенках до  $10^5$  Па, и совместный подвод водорода в центре потока и на стенках создадут необходимые условия для самовоспламенения и стабилизации горения. Но организация горения дежурных факелов оказалась сложной.

Пристеночный водород с  $\alpha_2 > 10$  не самовоспламенялся даже после подачи водорода 3 из пилон-стабилизатора с  $\alpha_3 = 16$ . При повышении расхода пристеночных струй они поджигались водородом 3, однако пуск керосина приводил к срыву горения. Только после дальнейшего увеличения расхода как пристеночного, так и пилонного водорода, а также времени горения дежурных факелов удалось добиться воспламенения керосина. Прекращение горения керосина наблюдалось только при отключении пристеночных струй водорода. При этом отключение пилонного водорода приводило лишь к небольшому уменьшению давления в канале. Рис. 3, а показывает, что уровень давлений, а следовательно, и полнота сгорания керосина в этой схеме ниже, чем с нишевыми стабилизаторами, но много больше, чем с пилоном-стабилизатором толщиной 15 мм. Интересно, что пилон-стабилизатор имел следы разрушения материала на передней кромке, а не в донной части, т. е., видимо, стабилизация горения керосина осуществлялась на пристеночных струях водорода и вообще горение керосина после воспламенения начиналось до пилон-стабилизатора.

Очевидно, решающая роль в организации горения керосина связана с созданием внешней контактной поверхности продуктов сгорания, обра-

зованной пристеночными струями водорода. При этом, по-видимому, без стабилизирующих элементов на стенке невозможно обойтись. Как альтернатива нишевым стабилизаторам в углах камеры сгорания перед отверстиями подачи водорода 2 установлены пластины, каждая с размерами  $10 \times 20$  мм (см. рис. 1, з). Площадь загромождения канала в сравнении со схемами с пилонами-стабилизаторами значительно уменьшилась. К тому же пластины занимали ту часть потока, где пограничный слой имел наибольшую толщину. По этой схеме керосин хорошо горел (см. рис. 3, б). Пристеночный водород 2 самовоспламенялся при  $\alpha_2 = 5,3$ , далее поджигался керосин. После снижения вдвое расхода водорода 2, а затем и полного его отключения керосин продолжал гореть. Нижняя граница расхода водорода 2, при которой он не самовоспламенялся, соответствует  $\alpha_2 \approx 11$ . Без горящих струй водорода 2 керосин вообще не воспламенялся. Сохранность стабилизирующих элементов после запусков была хорошей. Рис. 3, б показывает, что повышение давления в горле воздухозаборника при горении керосина в этой схеме было наименьшим. Для выяснения роли пластин в углах канала как стабилизаторов горения проведен контрольный эксперимент без этих пластин. Оказалось, что при  $\alpha_2 = 11 \div 5$  водород 2 не горит.

В исследованных в настоящей работе камерах сгорания на участке с постоянной площадью (при условии сохранения расчетного течения на входе в модель) можно сжечь топливо с расходом, соответствующим  $\alpha_1 > \alpha_{\text{пред}}$ . Под  $\alpha_{\text{пред}}$  подразумевается максимальное значение  $\alpha_1$ , при котором реализуется тепловое заклинивание канала. В условиях настоящих экспериментов  $\alpha_{\text{пред}} \approx 3$  при условии полного сгорания топлива. Чтобы сжигать больше топлива, канал необходимо расширять, но с увеличением угла интенсивность горения уменьшается, а при больших углах оно вообще прекращается. Оптимальное его значение, согласно [4], составляет  $0,5-1,5^\circ$ . Механизм уменьшения полноты сгорания струи водорода (горящей по диффузионной модели) в расширяющемся канале рассмотрен в работе [5]. Показано, что горение определяется смешением и в таком канале полнота сгорания должна быть невысокой при любой подаче топлива.

В предложенной в настоящей работе модели процесса горения струй керосина в канале постоянной площади происходит в псевдоскачке, т. е. ирреципирующе не диффузионным способом. В поисках способов организации горения на расширяющемся участке или же для поддержания горения, возникшего ранее на участке постоянной площади, можно также использовать предположение о том, что псевдоскачок на режимах с  $\alpha \leq \alpha_{\text{пред}}$  при взаимодействии с системой топливных струй сильно изменяет газодинамические и теплофизические процессы в объеме канала.

С учетом изложенных соображений перейдем к двухпоясному инжектору керосина, в котором часть топлива подается из одной стеновой системы перпендикулярно потоку (керосин 1), а часть — параллельно потоку с торца инжектора (керосин 4) из другой системы (рис. 4, а). В качестве стабилизаторов горения по-прежнему использовались пластины в углах канала. За область постоянной площади следовал расширяющийся с углом  $2^\circ$  участок (см. рис. 4, а, б).

Предполагалась следующая картина течения: керосин 1 поджигается фронтом горения пристеночных струй водорода 2, а керосин 4 — фронтом горения керосина 1 ниже по потоку на расширяющемся участке, так как при слупной подаче керосина 4 его струи хуже смешиваются с потоком и, следовательно, распространяются дальше. В качестве второго варианта расширяющегося участка использовался канал с углом расширения  $8^\circ$ , с поясом подачи водорода 5, состоящим из 14 отверстий с каждой стороны канала, а в конце имелись нишевые стабилизаторы, за которыми следовал участок постоянной площади. Двухпоясный инжектор сваривался из двух трубок диаметром 4 мм и переднего клина. Диаметр отверстий подачи керосина равен 0,3 мм, число отверстий изменялось от 9 до 14 для пояса керосина 4 и от 20 до 28 для керосина 1.

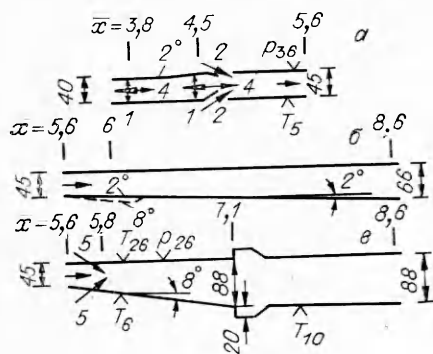
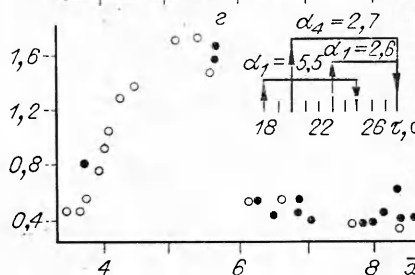
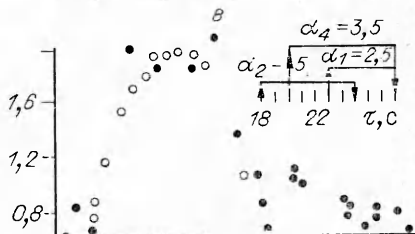
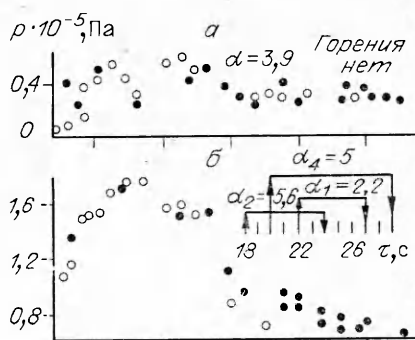


Рис. 4. Конфигурация камеры сгорания с двухпоясным инжектором керосина.

1—4 — керосин; 2, 5 — водород.

Рис. 5. Распределение статического давления вдоль канала камеры сгорания с двухпоясным инжектором керосина и пластинчатыми стабилизаторами в углах канала.

а, б — соответствует рис. 4, а, б, инжектор в сечении  $\bar{x} = 3,8$ ,  $\tau = 26$  с (б); в — рис. 4, а, б, инжектор в сечении  $\bar{x} = 4,5$ ,  $\tau = 27$  с; г — рис. 4, а, в, инжектор в сечении  $\bar{x} = 4,5$ ,  $\tau = 24,5$  с.



Первоначально двухпоясной инжектор установлен в сечении  $\bar{x} = 3,8$  в начале камеры сгорания. Как видно из рис. 5, а, при подаче керосина 1 и 4 с  $\alpha_{1+4} = 3,9$  без горения установка инжектора и массоподвод слабо влияют на распределение  $p(\bar{x})$ . При подаче в камеру сгорания последовательно водорода 2 с  $\alpha_2 = 6,4$ , керосина 1 с  $\alpha_1 = 4,1$  и керосина 4 с  $\alpha_4 = 8,3$  наблюдалось воспламенение керосина обоих поясов, однако после отключения водорода горение прекратилось. При этом при совместном горении керосина и водорода  $\alpha_{1+2+4} = 2$ , так что керосин 4 расплылся и поджигался в зоне псевдоскачка.

После отключения водорода значение  $\alpha_{1+4}$  возросло до 2,8, что примерно равно определенной ранее величине  $\alpha_{пред}$ . Однако, поскольку полнота сгорания керосина 4 меньше, чем керосина 1, величина  $\alpha_{пред}$  в этом эксперименте в действительности меньше 2,8, что и привело к срыву псевдоскачка и прекращению горения.

Для уточнения этого обстоятельства, а также для определения места начала горения керосина 4 расход керосина увеличили, а циклограмма подачи топлив изменилась: после водорода 2 подавался керосин 4, а затем керосин 1 (см. рис. 5, б). Керосин 4 также поджигался на струях водорода 2. Максимум теплосвода при совместном горении водорода 2 и керосина 4, ассоциируемого с максимумом статического давления, располагался вблизи сечения  $\bar{x} = 5,5$ . Поскольку при этом  $\alpha_{2+4} = 2,6 < \alpha_{пред}$ , у входа в модель перед обечайкой наблюдался отход скачка уплотнения. После подачи керосина 1 и отключения водорода 2 величина  $\alpha_{1+4} = 1,5$ , в результате горение керосина продолжалось, а на входе в модель образовалась мощная выбитая ударная волна. После отключения керосина 1 горение керосина 4 прекратилось. Отсюда можно сделать вывод, что керосин 4 действительно воспламенялся на струях водорода 2, но в рециркуляционные зоны за пластинами-стабилизаторами в углах канала, как керосин 1, не попадал.

Перенос двухпоясного инжектора вниз по потоку в сечение  $\bar{x} = 4,5$  позволил, как показывает график распределения статического давления на рис. 5, *в*, увеличить расход сжигаемого керосина до  $\alpha_{1+4} = 1,5$  с минимальным искажением течения на входе в модель. Максимум тепловыделения керосина 4, горящего совместно с водородом 2, как и раньше, находился вблизи сечения  $\bar{x} = 5,6$ , т. е. там, где предположительно смыкались фронты горения струй водорода 2. Уровень давления в канале на участках постоянной площади и расширяющемся при использовании двухпоясного инжектора существенно не возрос. Однако если в начале расширяющегося участка с углом  $2^\circ$  устроить выемку с углом расширения  $8^\circ$  (см. рис. 4, *б*), то при совместной подаче керосина из обеих поясов с  $\alpha_{1+4} = 1,5$  максимум давления сдвигался к сечению  $\bar{x} = 6$ , т. е. теплоподвод растягивался по длине. При этом исчезал характерный для всех экспериментов провал давления в сечении  $\bar{x} = 6,5$ , связанный с распадом псевдоскачка и ускорением потока.

Эксперимент с выемкой микронасадок полного давления, вводимых в поток в сечении  $\bar{x} = 5,4$  на короткое время, показал, что при горении керосина пульсации давления в потоке значительно больше, а течение в зоне горения близко к звуковому. Величина  $\sigma = p^*/p_\infty^*$  (здесь  $p^*$  — давление, измеряемое насадком) без горения равна 0,09, а с горением — 0,06—0,07. Эти данные указывают на взаимодействие процессов горения с системой волн псевдоскачка, который, учитывая передачу давления вверх по течению и уменьшение величины расхода воздуха через воздухозаборник, не может быть жестко зафиксирован в случае возникновения обратной связи тепловыделения и расхода воздуха через модель.

Увеличение угла расширения потока в камере сгорания с  $2$  до  $8^\circ$  (см. рис. 4, *а*, *в*) привело к неожиданному результату. Горение керосина с  $\alpha_1 = 2,6$  и  $\alpha_4 = 2,7$  после отключения подачи водорода 2 прекращалось, хотя при этом величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_4$  были меньше  $\alpha_{пред}$  (см. рис. 5, *г*). После достижения величины  $\alpha_1 = 2,1$  результат был тот же, псевдоскачок распадался, горение прекращалось. Это свидетельствовало о том, что ранее в камере сгорания с углом расширения  $2^\circ$  вследствие продолжения горения по крайней мере в начале расширяющегося участка обеспечивалась необходимая длина, на которой мог устойчиво реализоваться псевдоскачок.

Таким образом, для организации горения керосина непосредственно на расширяющихся участках необходимо не только создавать на них условия устойчивого существования псевдоскачка, но и уметь переводить псевдоскачок из одного участка камеры сгорания в другой. Такие условия созданы при использовании дополнительного пояса подачи водорода 5 (см. рис. 4, *а*, *в*) и определенной циклограммы подачи топлив (рис. 6). После начала горения керосина с  $\alpha_{1+4} = 1,5$  расход водорода уменьшался с  $\alpha_2 = 7,4$  до 10,3, но при этом подавался водород 5 в начале расширяющегося участка, и уже затем водород 2 отключался полностью.

Несколько осциллограмм величин давлений и температур в отдельных точках модели представлены на рис. 6. Видно, что после самовоспламенения водорода 2 произошло поджигание керосина 1 и 4, горение которого продолжалось и при  $\alpha_2 = 10,3$ . При подаче водорода 5 давление на участке постоянной площади не изменилось, а на расширяющемся участке за сечением подачи водорода 5 увеличилось, что свидетельствовало о его горении. После отключения водорода 2 давление на участке постоянной площади начало падать в связи с прекращением на нем горения, а на расширяющемся участке продолжало увеличиваться с возросшим градиентом. Изменение градиента температуры стенки на разных участках, синхронное с изменением величины статического давления, подтверждало факт прекращения горения керосина 1 и 4 на участке постоянной площади после отключения водорода 2 и перемещения зоны горения в расширяющийся с углом  $8^\circ$  участок.

За время совместного горения водорода 5, керосина 1 + 4 с  $\alpha_{1+4+5} = 1,1$  давление в расширяющемся канале возросло до  $0,75 \cdot 10^5$  Па и

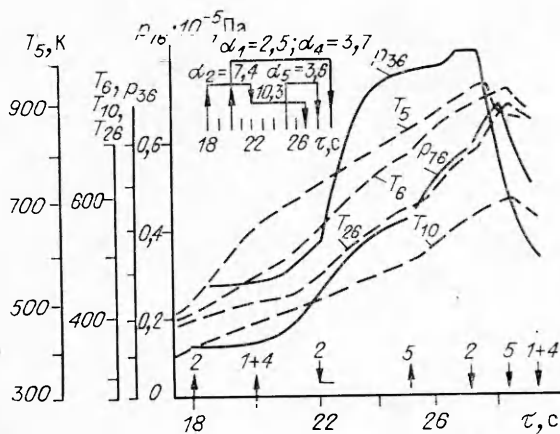


Рис. 6. Осциллограммы давления и температуры в характерных точках канала камеры сгорания с двухполюсным инжектором керосина в сечении  $\bar{x} = 4,5$  и пластинчатыми стабилизаторами при подаче водорода в начале расширяющегося с углом  $8^\circ$  участка (конфигурация рис. 4, в).

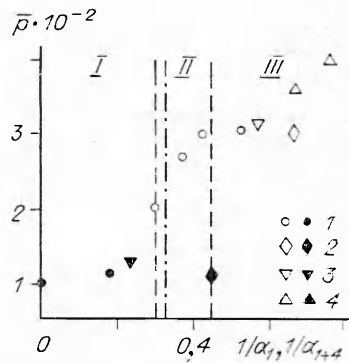


Рис. 7. Зависимость относительного давления  $\bar{p} = p/p_\infty^*$  в сечении  $\bar{x} = 5,5$  от расхода керосина (штрихпунктирная линия соответствует расчетной предельной величине  $1/\alpha_{\text{пред}}$  в канале постоянной площади).

$\bar{x}$ : 1—3,8, 2—4—4,5; 1, 2 — ниши, 3, 4 — пластины; светлые точки — горение, темные — горения нет.

продолжало увеличиваться, за исключением начала этого участка, где давление стабилизировалось на уровне  $0,8 \cdot 10^5$  Па. Поскольку давление здесь без горения составляло  $0,2 \cdot 10^5$  Па, такой уровень давления в канале с расширением  $8^\circ$  возможен только при установлении в нем псевдоскачка. Следует отметить, что после отключения водорода 2 и прекращения горения на участке постоянной площади на входе в модель исчезли даже те небольшие отклонения от схемы расчетного горения, которые до того имелись, и при совместном горении водорода 5 и керосина 1+4 течение на входе было полностью расчетным. После отключения водорода 5 горение керосина 1+4 прекратилось.

Исходя из предложенной модели процесса, можно предположить, что ниши расширяющегося участка в данном случае стабилизировали горение, хотя бы потому, что в них попадало мало керосина. Поэтому следует продолжить поиск других стабилизирующих элементов на стенках и оптимального их размещения. Возможно и другое объяснение прекращения горения керосина в расширяющемся с углом  $8^\circ$  участке: после отключения водорода 5 величина  $\alpha_{1+4}$  увеличилась до 1,5 (т. е. до значения, большего, чем  $\alpha_{\text{пред}}$ , для данного эксперимента), теплоподвод упал, произошло разрушение псевдоскачка.

Проведенные эксперименты показали, что после воспламенения керосина 1+4 горящими струями водорода 2 дальнейшее его горение при отключенной подаче водорода 2 обязательно продолжается при наличии расширяющегося с углом  $2^\circ$  участка, если величина  $\alpha_1$  или  $\alpha_{1+4}$  меньше значений, группирующихся около  $\alpha_{\text{пред}} = 3$  в довольно узкой области (рис. 7). В этой же области горение керосина может и прекратиться, а вне ее всегда прекращается после отключения водорода 2. Вообще, и поджигается керосин при  $\alpha_{1+2}$  и  $\alpha_{1+4+2} < \alpha_{\text{пред}}$ . Но в случае использования двухполюсного инжектора определяющей является подача керосина I пояса перпендикулярной подачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Орт, Камерон. Течение за уступом в модельной камере сгорания ГПВРД со сверхзвуковым горением // РТК.— 1975.— № 9.
2. Исаак, Куксон. Способ воспламенения жидких и газообразных горючих в сверхзвуковом потоке // Там же.— 1973.— № 7.



3. Kay I. W., Peschke W. T., Guile R. N. Hydrocarbon-fueled scramjet combustor investigation // AIAA Paper 90-2337, 1990.
4. Уолтроп. ГПВРД, работающие на некриогенных жидких топливах // Аэрокосмическая техника.— 1988.— № 8.
5. Мецерыков Е. А. О подводе тепла в сверхзвуковом потоке // Уч. зап. ЦАГИ.— 1987.— XVIII.— № 2.

г. Жуковский

Поступила в редакцию 26/XI 1991

УДК 536.46 : 532.517

Л. А. Клячко

### ГОРЕНИЕ КАПЕЛЬ ТОПЛИВА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Развита теория полного срыва пламени с капли жидкого топлива. Дано сопоставление предложенной теории с экспериментальными данными. Определена скорость капли по отношению к обтекающему ее турбулентному моллю воздуха в зависимости от времени. Показана возможность горения капель топлива (как индивидуальных образований) на максимальном и крейсерском режимах работы камеры сгорания ГТД.

Горение распыленного топлива в турбулентном потоке воздуха уже давно привлекает внимание исследователей в связи с тем, что этот процесс используется в ряде технических устройств (камеры сгорания газотурбинных двигателей (ГТД), промышленные топки, двигатели Дизеля).

Экспериментальные исследования указанного процесса [1—5] свидетельствуют о существенных отличиях в механизме распространения пламени в двухфазных топливовоздушных смесях по сравнению с однородными. В пламенах, распространяющихся в двухфазных смесях при малом содержании испаренного топлива, отчетливо видны следы горящих капель (или их совокупностей) и коэффициент избытка воздуха на нижнем пределе распространения пламени (рассчитанный по паровой фазе) превышает  $\alpha_n = 5,0$ , т. е. намного превосходит значение  $\alpha$  на нижнем пределе распространения пламени в однородных смесях. Последнее обстоятельство также, несомненно, свидетельствует о горении капель топлива в турбулентном потоке.

Среди упомянутых наибольший интерес представляют работы [4, 5], в которых горение двухфазных смесей исследовалось при достаточно большой скорости турбулентного потока. В [1] опыты проводились при атмосферном давлении, температуре воздуха  $T_b = 470 \div 570$  К, скорости потока  $v = 20 \div 84$  м/с и диапазоне изменения диаметра капель керосина  $50 \leq d_k \leq 108$  мкм. Горение капель в условиях большого избытка воздуха по паровой фазе ( $\alpha_n = 2,9 \div 4,03$ ) наблюдалось при пульсационной скорости потока  $v' = 0,8 \div 1,5$  м/с, которой соответствует интенсивность турбулентности  $\epsilon = 5 \div 7$  %. Отношение скорости турбулентного распространения пламени  $u_T$  к пульсационной скорости потока в этих опытах составило  $u_T/v' \approx 3,3$ .

В работе [5] исследования проводились при атмосферном давлении, комнатной температуре воздуха,  $v = 10,4 \div 33$  м/с в диапазоне изменения диаметра капель тяжелого топлива JP-7  $30 \leq d_k \leq 120$  мкм. Капли горели при суммарном коэффициенте избытка воздуха вплоть до  $\alpha_s = 3,4$  и намного большей величине  $\alpha$  по паровой фазе. В этих условиях  $u_T = 4,0 \div 5,3$  и  $1,65 \div 4,15$  м/с при  $d_k = 30$  и  $60$  мкм соответственно.

Если принять, что отношение  $u_T/v'$  оставалось тем же, что и в работе [1], то указанным значениям  $u_T$  соответствует  $v' = 1,2 \div 1,6$  м/с для капель с  $d_k = 30$  мкм и  $v' = 0,5 \div 1,25$  м/с для  $d_k = 60$  мкм, при этом  $\epsilon \leq 12$  %<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В работе [5] непосредственно степень испарения топлива и интенсивность турбулентности не измерялись.