

Выводы

Изучены критические условия возникновения конвективного горения в слое порошкообразной пикриновой кислоты.

Выявлено влияние свойств ВВ, воспламенителя и состояния внутренней поверхности канала оболочки на критическую высоту слоя, характеризующую переход от послойного горения к конвективному.

Получены пространственные профили давления в процессе возникновения конвективного горения. Установлено, что для одинаковых по плотности и размеру частиц образцов характер распределения и значения давления во фронте пламени и за ним могут заметно различаться в зависимости от интенсивности протекания предшествующей стадии развития полости и уплотнения ВВ.

Показано, что в момент возникновения конвективного горения наблюдаются два заметно отличающихся профиля давления. Для одного характерно существование вблизи фронта пламени пикообразного распределения, для другого — наличие плавного повышения давления. Определены условия, в которых реализуется тот или иной профиль давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.
2. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика. — М.: Оборонгиз, 1949.
3. Зельдович Я.Б., Равин М.А., Франк-Каменецкий Д.А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1963.
4. Храповский В.Е. О начальной стадии процесса при поджигании порошкообразного ВВ с закрытого торца // ФГВ. — 1993. — 29, № 2.
5. Ермолаев Б.С., Фотеенков В.А., Хасанов Б.А. и др. Критические условия перехода горения во взрыв в зерновых взрывчатых материалах // ФГВ. — 1990. — 26, № 5. — С. 102—110.
6. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960.

117977, г. Москва,
ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН

Поступила в редакцию
15/VI 1992,
после доработки — 5/V 1994

УДК 533.6.011

В.А. Левин, В.Н. Пережогин, А.Н. Хмелевский

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛУЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ

Приведены результаты экспериментального исследования особенностей истечения высокотемпературных продуктов сгорания ацетилено- и водородно-воздушных топлив через компактное кольцевое сопловое устройство с кормовой полузамкнутой полостью. Эксперименты выполнены в импульсной аэродинамической установке. Определены условия возникновения пульсаций давления и измерена их частота. Проведены измерения реактивной силы в зависимости от размера критического сечения соплового устройства и степени избытка окислителя. По результатам равновесных термодинамических расчетов параметров продуктов сгорания используемых топлив и измеренным значениям реактивной силы получены оценки величины удельного импульса кольцевого соплового устройства.

Продукты сгорания ракетных топлив после их расширения в соплах, обеспечивающих максимальную тягу двигателей, могут содержать в зависимости от вида топлива компоненты горючего (CO , H_2) и окислителя (O_2). Однако при расширении в соплах Левалея происходит достаточно глубокое «замораживание» химического состава смеси за счет быстрого расширения потока и падения поступательной температуры, в результате

© В.А. Левин, В.Н. Пережогин, А.Н. Хмелевский, 1995.

химические реакции заметно замедляются. Вместе с тем известно [1—5], что энерговыделение при химических реакциях горения в донной области за летящей моделью существенно уменьшает донное сопротивление и создает эффект реактивной тяги.

Попытка использования энергии химических реакций между компонентами продуктов сгорания ракетных топлив для создания дополнительной тяги соплового устройства требует специальной организации процесса истечения продуктов сгорания через сопло, обеспечивающей заметное повышение температуры, и поиск топливных композиций, имеющих в составе конечных продуктов повышенное содержание компонентов, способных к химическим превращениям.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование условий истечения продуктов сгорания ацетилено- или водородно-воздушных топлив из соплового устройства компактной конструкции с кормовой полузамкнутой полостью (ПЗП) [6]. Взаимодействие радиальной кольцевой сходящейся струи с ПЗП приводит к формированию в данной области зон повышенного давления и температуры, где создаются благоприятные условия для протекания реакции в продуктах сгорания, либо в специально вдуваемых в донную область горючих компонентах. Энерговыделение в последних должно приводить к увеличению давления в ПЗП и, следовательно, тяги соплового устройства.

На первом этапе экспериментально исследованы характер изменения давления в данной области и силы, действующей на ПЗП, в зависимости от степени избытка окислителя α и размера критического сечения соплового устройства h_c . Использовались ацетилено- или водородно-воздушные топливные композиции для продувок продуктами сгорания соплового устройства в гомогенном режиме.

Экспериментальная установка и методики измерений

Эксперименты проводились в импульсной аэродинамической установке, предназначенной для получения и исследования газодинамических характеристик потоков высокотемпературных продуктов сгорания различных топлив при их истечении через сопловое устройство. На рис. 1 представлен общий вид газодинамического блока установки (1 — электровоспламенитель, 2 — мановакуумметр, 3 — камера сгорания, 4 — диафрагма, 5 — система газообеспечения, 6 — датчик усилий, 7 — приемная полость модели, 8 — поршень, 9, 10, 13 — датчики давления, 11 — полость ресивера, 12 — электроразъем).

Топливная смесь сгорала в реакторе объемом 2 либо 14 л, расположенном на верхнем фланце блока. Воспламенение смеси инициировалось электровоспламенителем из тонкой проволоочки нихрома при разряде через нее конденсаторной батареи с помощью игнитронного разрядника ИРТ-100. Высокотемпературные продукты сгорания по переходнику попадали во входную часть модели соплового устройства.

Истекающие из сопла газы попадали в вакуумную емкость. Соединения всех узлов и деталей установки герметизировали, что позволяло откачивать систему двумя насосами типа ВН1-МГ производительностью $18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ каждый до вакуума порядка 2,67 Па.

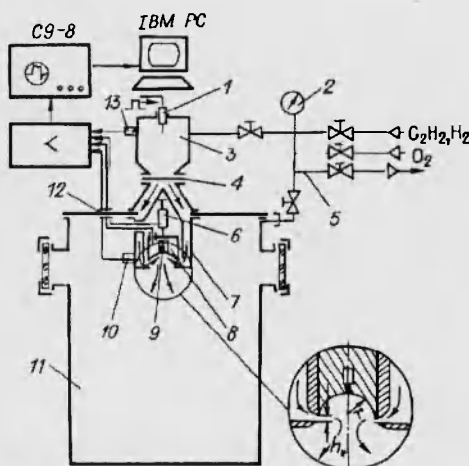


Рис. 1.

Один насос откачивал систему наполнения реактора газами, другой — вакуумную емкость установки. Электронные блоки поджигания и синхронизации позволяли инициировать воспламенение топливной смеси в реакторе и синхронно запускать регистрирующую аппаратуру.

Для регистрации давления в процессе взрыва горючей смеси в реакторе и особенностей истечения продуктов сгорания из соплового устройства использовались стандартные пьезодатчики ЛХ-601, ЛХ-611, которые через истоковые повторители подключались ко входам цифровых осциллографов. Сигналы с последних обрабатывались с помощью персонального компьютера типа IBM PC. Пьезодатчики монтировались заподлицо с внутренней поверхностью. В боковую стенку камеры сгорания дополнительно устанавливался тензометрический датчик давления типа ЛХ-415 для сравнения его показаний с показаниями пьезодатчиков. Тарировка пьезодатчиков проводилась с использованием двух независимых методик [7,8]: с помощью пневматического датчика давления и по методу взрыва в сферической бомбе постоянного объема. Обе методики в пределах точности измерений ($\approx 15\%$) дали совпадающие результаты.

Одновременная регистрация изменения давления при взрыве в бомбе тензометрическим датчиком и пьезодатчиками позволила оценить уход нуля сигналов пьезодатчиков, связанных с потерей заряда за счет прогрева их корпуса [9]. Для пьезодатчика ЛХ-601, коэффициент ухода

$$K = dA/At \approx 0,012 \text{ 1/мс,}$$

где dA — уход нуля при величине сигнала A в интервале времени $t \sim 10$ мс.

Для измерения реактивной силы, которую создают истекающие из сопла продукты сгорания, ПЗЛ подсоединялась к одному из нагрузочных плеч тензометрического датчика усилий типа ЛХ-144-IV (см. рис. 1). Другое его плечо вворачивалось в корпус соплового устройства. Для усиления сигналов тензометрических датчиков использовалась тензостанция ЛХ-7000 с У-фильтром на 1000 Гц. Для регистрации сигналов с тензо- и пьезодатчиков использовались цифровые электронные осциллографы.

Поскольку датчик усилий ЛХ-144-IV в условиях экспериментов использовался для измерений в быстротекающем процессе, выполнено специальное исследование по сопоставлению паспортных данных его чувствительности, полученной в условиях статической калибровки, с данными его динамической калибровки в условиях эксплуатации. Это позволило также определить степень инерционности отклика датчика усилий на его импульсное нагружение в рабочих режимах.

На выходе соплового устройства устанавливалась заглушка, препятствующая истечению продуктов сгорания в ресивер, и регистрировалось давление в процессе пуска в камере сгорания, на входе модели и в ПЗП, а также записывался сигнал с датчика усилий. Измерения показали, что датчик усилий практически успевает «отследить» все медленные ($f < 1000$ Гц) изменения давления на входе модели. Сравнение сигналов с пьезодатчиков в камере сгорания, на входе модели и в ПЗП показывает, что темп падения величины сигналов давления после достижения максимума наибольший в ПЗП, затем во входной части модели и, наконец, самый медленный в камере сгорания. Это обусловлено различной интенсивностью прогрева мембран пьезодатчиков, установленных в различных точках газодинамического тракта. Наибольший тепловой поток к поверхности ПЗП обуславливает и наиболее сильную деформацию мембраны и соответственный уход нуля датчика. Нанесение крешерной мастики для теплозащиты мембраны существенно уменьшило температурное влияние на показания пьезодатчиков. Тем не менее уменьшение сигнала датчика, установленного в ПЗП, достигало $\approx 40\%$ за время ~ 5 мс.

Совпадение давления во входной части модели с величиной, определенной на основе паспортных данных статической калибровки датчика как отношение усилия действующего на ПЗП к площади поперечного сечения ПЗП, подтвердило возможность использования последних для обработки

результатов измерений усилий в условиях быстротекающего процесса в опытах данной работы.

Реактивная сила, действующая на ПЗП, при истечении продуктов сгорания

Реактивная сила, действующая на ПЗП, и удельный импульс, получаемые при истечении продуктов сгорания через сопловое устройство, — важнейшие параметры [10], характеризующие возможность его практического использования. Эксперименты по измерению реактивной силы проводились в импульсной аэродинамической установке. Цель исследования — выяснение оптимальных условий (по составу продуктов сгорания горючей смеси и размерам минимального сечения модели) для получения наибольшего удельного импульса и реактивной силы. В качестве топливных композиций исследовались ацетилено- и водородно-воздушные смеси. Составы продуктов сгорания определялись на основе равновесных термодинамических расчетов по методике [11]. Наиболее важной характеристикой горения топливной смеси в камере сгорания (реакторе аэродинамической установки) служит величина максимального давления в продуктах взрыва $p_{к\max}$. Отклонение значений $p_{к\max}$ от данных равновесного термодинамического расчета связано с особенностями распространения фронта горения во взрывной камере, а также с влиянием теплоотвода. По отклонению $p_{к\max}$ от расчетных значений можно судить о степени завершенности процесса горения и соответствии концентрации продуктов горения расчетному составу [12]. Расчет показывает, что горение смесей приводит к незначительному изменению количества молей μ в газе, поэтому повышение давления в продуктах взрыва можно рассчитывать, используя уравнение состояния газа и экспериментальные значения конечных температур T_k , которые для ацетиленовоздушных смесей приведены в [13—15]:

$$p_{к\max} = p_n \frac{T_k \mu_n}{T_n \mu_k}$$

Здесь μ — молекулярная масса смеси: индексы n и k соответствуют начальным и конечным составам.

В эксперименте специально подобранные диафрагмы обеспечивали поступление продуктов сгорания из реактора аэродинамической установки на вход соплового устройства с 10%-й точностью по отношению к достижению максимального давления в продуктах взрыва. Это позволило обеспечить одинаковые условия по полноте сгорания топлива и считать состав, поступающий на вход соплового устройства, равновесным. Температура продуктов взрыва определялась по начальной концентрации ацетилена в смеси, в соответствии с результатами измерений [13—15]. При использовании водородно-воздушных смесей значение T_k рассчитывалось по результатам измерений конечного давления в продуктах сгорания с использованием уравнения состояния и данных термодинамического расчета по изменению числа молей в ходе реакции — так называемая объемная температура [16].

При работе с импульсными аэродинамическими установками взрывного типа необходимо разделять во времени процессы сгорания топливной смеси и получения высокотемпературных продуктов реакции и истечения смеси через сопловое устройство. Сгорание контролировали по показаниям датчика давления, установленного в стенке реактора. Характерная осциллограмма сигнала давления в реакторе p_k при сгорании водородно-воздушной смеси приведена на рис. 2, где также показаны сигналы давлений p_{\max} , $p_{ПЗП}$ и усилия R в опыте с $\alpha = 1,5$, $h_* = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м (масштабы сигналов p_k , p_{\max} , $p_{ПЗП}$ и R по вертикали равны 0,71; 0,46; 0,11 МПа/дел и 270,5 Н/дел соответственно).

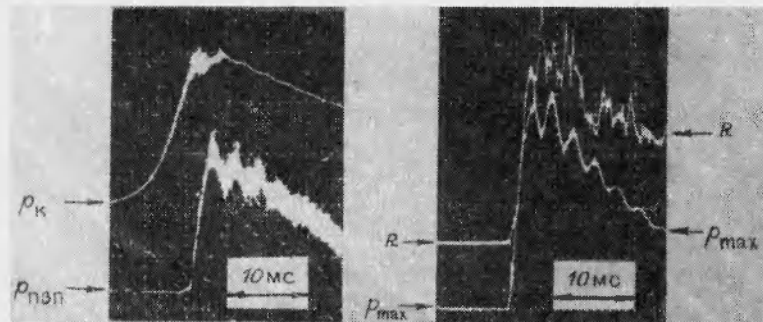


Рис. 2.

Сгорание смеси и повышение давления в реакторе приводят к разрушению диафрагмы и истечению продуктов взрыва в предсопловой объем — камеру соплового устройства. Выравнивание давления со временем приводит к падению давления в реакторе и его возрастанию в сопловой камере p_{\max} . После этого p_{\max} снижается за счет расхода газа через критическое сечение сопла. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы сигналов с датчиков давления, установленных в реакторе и в боковой стенке камеры соплового устройства. Сигнал $p_{\text{пзп}}$ с датчика давления (см. рис. 1, 9), установленного в данной области, ПЗП отслеживает все изменения давления, происходящие во входной части сопла.

Измерение силы R , действующей на ПЗП при истечении через сопловое устройство продуктов сгорания, приводилось тензодатчиком ЛХ-144, частотные характеристики которого более низкие, чем пьезодатчиков давления. Представленные на рис. 2 осциллограммы изменения давления в камере и силы давления на ПЗП показывают, что тензодатчик отслеживает общий характер спада давления в камере соплового устройства, однако за счет своей инерционности (собственная частота датчика $f = 10\,000$ Гц) не может воспроизвести детали его изменения, связанные с высокочастотными колебаниями давления во входной части сопла.

По результатам измерений реактивной силы, аналогичным тем, что показаны на рис. 2, удельный импульс $I_{\text{уд}}$ рассчитывался с использованием соотношения [10]

$$I_{\text{уд}} = R/G,$$

где R — сила, действующая на ПЗП и измеряемая непосредственно в опыте; G — расход газа через сопловое устройство, определяемый по уравнению

$$G = \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} S_{\text{кр}} p_{\max} / \sqrt{R_0 T / \mu},$$

γ, μ — показатель адиабаты смеси и молекулярная масса смеси, известные из термодинамических расчетов; R_0 — универсальная газовая постоянная; $S_{\text{кр}}$ — площадь критического сечения. При расчетах G предполагалось, что звуковая поверхность в сверхзвуковом сопле совпадает с минимальным сечением. Величина p_{\max} измерялась непосредственно в опытах (см. рис. 2), а температура торможения T вычислялась по p_{\max} в предположении адиабатического изменения параметров торможения [17]. ПЗП осесимметричной модели представляла собой полусферу с диаметром $2r = 7 \cdot 10^{-2}$ м. Минимальное сечение соплового устройства составляло $0,8 \cdot 10^{-3} \div 4,4 \cdot 10^{-3}$ м. Во всех экспериментах давление продуктов сгорания во входной части модели не превышало 1—1,5 МПа, а температура варьировалась за счет степени избытка окислителя в пределах $\alpha = 0,5 \div 1,5$ в исходной

топливной смеси, для ацетиленовоздушных смесей $T = 2100 \div 2650$ К и 2100—2600 К для водородно-воздушных.

При обработке осциллограмм сигналов использовались интервалы времени ~ 10 мс после разрыва диафрагмы в камере сгорания. Рассчитанные значения удельного импульса сравнивались (при одинаковых условиях на входе) с максимальными значениями удельного импульса для сопла Лавала, которые определялись по известному соотношению [10]

$$I_{\text{уд. max}} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{R_0}{\mu} T}$$

Анализ результатов обработки экспериментов показал, что реактивная сила истекающих продуктов сгорания возрастает с увеличением размера минимального сечения соплового устройства. Так, при использовании стехиометрической ацетиленовоздушной смеси увеличение размера минимального сечения от $0,8 \cdot 10^{-3}$ до $4,4 \cdot 10^{-3}$ м приводило к возрастанию реактивной силы от 1000 до 2000 Н соответственно.

Оценки $I_{\text{уд}}$ по приведенным выше формулам показывают, что значения $I_{\text{уд}}$ для исследованного соплового устройства с кормовой полужамкнутой полостью оказываются близки к соответствующим величинам для максимальной тяги сопел Лавала.

Особенности изменения давления в ПЗП соплового устройства

Давление в ПЗП определяет реактивную силу, создаваемую истекающими из соплового устройства продуктами сгорания, и является важнейшим газодинамическим параметром, подлежащим контролю при исследовании газодинамики течения в модели.

Для типичных сигналов с датчика давления, установленного в ПЗП (см. рис. 2), характерно наличие шума, накладывающегося на основной сигнал. Для анализа его спектрального состава специально исследованы отдельные участки сигнала давления в ПЗП на быстрых развертках осциллографа. Для этого наряду с регистрацией общего характера изменения сигнала с датчика давления в ПЗП во время пуска можно было получать быстрые «развертки» процесса с момента, определяемого регулируемой задержкой относительно начала процесса (задержка τ на рис. 3).

Пример подобного исследования отдельного участка шумового сигнала давления в ПЗП, начиная с момента, указанного стрелкой, приведен на рис. 3, где показаны сигналы изменения давлений в опыте с ацетиленовоздушной смесью ($\alpha = 1,0$, $h_* = 4,4 \cdot 10^{-3}$ м, масштабы сигналов p_k и $p_{\text{ПЗП}}$ по вертикали равны 0,69 и 0,25 МПа/дел соответственно) при несимметричном раскрытии лепестков диафрагмы 4 на рис. 1. На быстрых развертках наглядно видно, что в шумовой составляющей анализируемого сигнала отсутствует какая-либо выделенная частота, накладываемая на более медленное изменение среднего уровня $p_{\text{ПЗП}}$, определяемого давлением торможения на входе модели $p_{\text{м.в.}}$ на рис. 3. Такой же характер имели сигналы давления в ПЗП в большинстве исследованных режимов при истечении продуктов сгорания ацетилено- и водородно-воздушных смесей и различных значениях h_* и α .

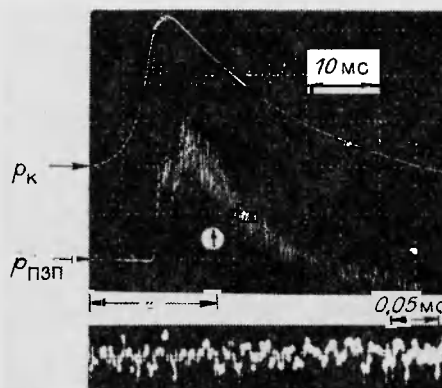


Рис. 3.

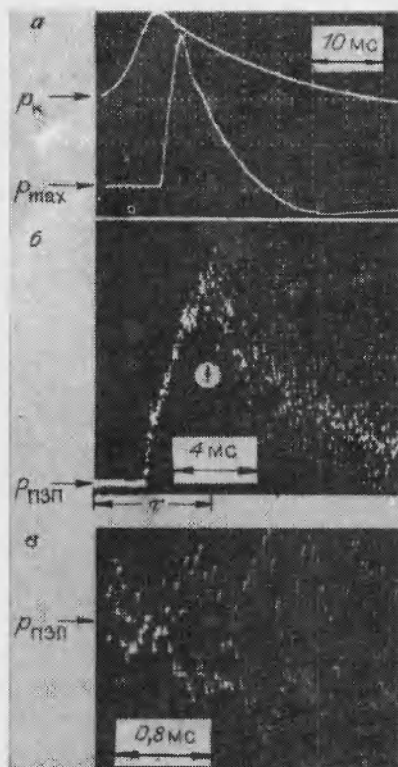


Рис. 4.

Особенности в поведении давления в ПЗП зафиксированы в режимах экспериментов с ацетиленовоздушной смесью стехиометрического состава ($\alpha = 1,0$) и водородно-воздушной смесью с избытком окислителя ($\alpha = 1,5$) при увеличении минимального сечения осесимметричной модели h_* до $4,4 \cdot 10^{-3}$ м. Обзорный снимок записи сигнала изменения давления в ПЗП (а также сигналов с датчика давления в камере сгорания p_* и во входной части модели p_{\max} при симметричном раскрытии лепестков диафрагмы) представлен на рис. 4, а, б, а на более быстрой развертке на рис. 4, в (масштабы сигналов p_k , p_{\max} , $p_{\text{пзп}}$ по вертикали равны 1,03; 0,47; 0,2 МПа/дел соответственно). Развертки начинаются в области максимального значения давления в ПЗП (начало разверток обозначено стрелкой на рис. 4, б). Видно, что в составе сигнала ПЗП появились высокочастотные колебания — пульсации, имеющие амплитуду, значительно превышающую уровень шумов на рис. 3, и происходящие с частотой ~ 27 кГц, которые

в свою очередь промодулированы низкочастотным сигналом с частотой $\sim 2,7$ кГц.

Обзорные снимки и быстрые развертки сигналов на рис. 3, 4 получены с использованием пьезодатчика ЛХ-601, собственная частота которого значительно превышает 30 кГц. Для уточнения частоты пульсационных колебаний давления в ПЗП выполнена серия измерений с заменой пьезодатчика ЛХ-601 на новый типа ЛХ-611, собственная частота которого составляет 63—70 кГц. Типичный сигнал изменения давления в ПЗП, полученный с использованием этого датчика, представлен на рис. 5 (раскрытие лепестков диафрагмы 4 на рис. 1 симметричное, масштабы сигналов p_k , $p_{\text{пзп}}$ по вертикали равны 0,69 и 0,24 МПа/дел соответственно). На рис. 5 задержка $\tau = 20$ мс, а измеряемая частота пульсации ~ 24 кГц. Амплитуда пульсационной составляющей давления достигает 1,2 МПа и сравнима с величиной полного давления на входе в модель.

Таким образом, измерение частоты пульсаций давления в ПЗП с использованием более совершенного пьезодатчика подтвердило наличие пульсационного изменения давления в ПЗП в исследованном режиме: $\alpha = 1,0$, $h_* = 4,4 \cdot 10^{-3}$ м с ацетиленовоздушной смесью.

Следует отметить особую критичность возникновения пульсационного режима истечения к условиям запуска соплового устройства: в случае неполного (несимметричного) раскрытия лепестков диафрагмы (см. рис. 1, 4),

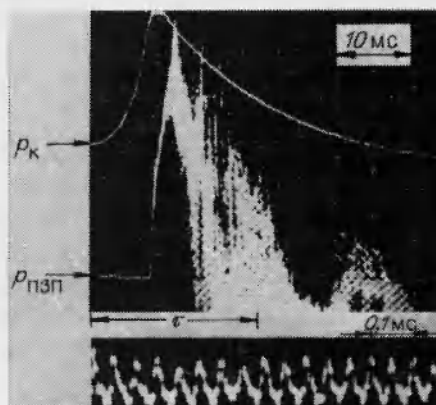


Рис. 5.

ограничивающей камеру сгорания от входной части модели, темп нарастания давления на входе сопла существенно замедлялся по сравнению со случаем полного раскрытия ее лепестков, когда темп нарастания был максимальным. В результате неполного раскрытия диафрагмы не обеспечивалась равномерность подачи продуктов сгорания на вход осесимметричного соплового устройства, и в таких режимах (при прочих равных условиях) пульсаций давлений в ПЗП не возникало (ср. рис. 3 и 4, 5).

Выводы

В результате проведения исследования процессов, происходящих при течении высокотемпературных продуктов сгорания ацетилено- и водородно-воздушных топлив через осесимметричное сопловое устройство с кормовой полузамкнутой полостью, установлено существование пульсационного режима изменения давления в ПЗП и условий его возникновения. Измеренная частота пульсаций при истечении продуктов сгорания стехиометрической ацетиленовоздушной смеси составила ~ 25 кГц при $h_* = 4,4 \cdot 10^{-3}$ м и $p_{\max} \approx 1,5$ МПа.

Возникновение пульсаций оказалось очень чувствительным к условиям запуска соплового устройства: необходимо обеспечить равномерно осесимметричную подачу продуктов сгорания на вход осесимметричного соплового устройства для запуска его в пульсационном режиме. Исследование зависимости величины реактивной силы от размера критического сечения и состава топливной смеси указывает на ее рост при увеличении критического сечения: так, при использовании стехиометрической ацетиленовоздушной смеси увеличение зазора в критическом сечении до $4,4 \cdot 10^{-3}$ м приводило к возрастанию реактивной силы до 2000 Н. Измеренные абсолютные значения R и проведенные оценки I_{max} указывают на эффективность использования соплового устройства с кормовой полузамкнутой полостью для создания тяги двигателя.

Авторы благодарят Г.Д. Смехова за выполнение расчетов равновесных термодинамических параметров продуктов сгорания топливных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нил Д.Х., Хаббарт Дж.Э. и др. Влияние внешнего сжатия на течение в осесимметричном турбулентном ближнем следе // РТК. — 1978. — 16, № 9. — С. 6—9.
2. Шадов К.К., Чиз Д.Дж. Экспериментальное исследование уменьшения донного сопротивления при комбинированном поперечном и осевом вдуве // РТК. — 1978. — 16, № 10. — С. 78—85.
3. Нил Д.Х., Хаббарт Дж.Э., Штрале В.К. Влияние радиального и осевого донного вдува воздуха на ближний след при наличии внешнего сжатия и без него // РТК. — 1979. — 17, № 3. — С. 92—94.
4. Хаббарт Дж.Э., Штрале В.К., Нил Д.Х. Исследование влияния горения в периферийной и донной областях следа на донное сопротивление при числе Маха набегающего потока 3 // РТК. — 1981. — 19, № 8. — С. 89—95.
5. Гогиш Л.В., Иванов О.Н. и др. Исследование вдува газа в донную полость // Изв. АН СССР, МЖГ. — 1989. — № 4. — С. 170—172.
6. Пушкин Р.М., Тарасов А.И. Способ получения тяги и устройство для получения тяги // Патент СССР № 1672933 от 22.04.91, заявка № 4762675 с приоритетом от 30.11.1989.
7. Бойков Н.А., Звездин П.С., Резник Л.Б. Измерение давлений при быстропотекающих процессах. — М.: Энергия, 1970.
8. Schweppe J.L., Eichberger L.C. et al. Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers // US NBS Monograph 67. — 1963.
9. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур. — М.: Мир, 1966.
10. Васильев А.П., Кудрявцев В.М. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. — М.: Выс. шк., 1975.
11. Смехов Г.Д., Фотиев В.А. О вычислении равновесного состава высокотемпературного газа // ЖВМФ. — 1978. — 18, № 5. — С. 1283—1290.
12. Иост В. Взрывы и горение в газах. — М.: ИЛ, 1952.
13. Иванов Б.А. Физика взрыва ацетилена. — М.: Химия, 1969.
14. Иванов В.М. Исследование характеристик газодинамического лазера на продуктах углеводородо-воздушных смесей. — М., 1978. — (Диссертация к.ф.-м.н., ИПМ).
15. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во МГУ, 1957.

16. Muzio L.J., Smith D.S., Starkman E.S. Emission-Absorption Temperature Measurements in the Cylinder of Spark Ignition Engine // Comb. and Flame. — 1972. — 18, № 3. — P. 315—319.
17. Соснин Е.И. Изменение параметров газа в процессах наполнения и опорожнения емкостей. — М., 1976. — (Труды ЦАГИ, вып. 1786).

119899, г. Москва,
НИИМ МГУ им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию, 14/III 1994,
после доработки — 1/VIII 1994

УДК 533.92:536.46

Д.А. Ягодников, А.В. Воронцовский

ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОПАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрены различные способы организации воздействия внешнего электрического поля на горение пропановоздушной смеси при атмосферном давлении. Исследовано влияние полярности прикладываемого напряжения, места расположения кольцевого электрода (продольное поле) и диаметра цилиндрического электрода (поперечное поле) на величину скорости срыва пламени при различных значениях массового расхода пропана. Показано, что наибольшая устойчивость пламени к срыву реализуется в случае использования цилиндрического сетчатого электрода. Измерены значения ионизационного тока по высоте пламени. Дано объяснение полученных результатов.

В проведенных к настоящему времени экспериментальных исследованиях, посвященных изучению воздействия внешнего электрического поля (ВЭП) на характеристики воспламенения и горения различных топливных композиций, установлены зависимости скорости срыва пламени $v_{ср}$ от величины напряжения ВЭП, химического состава топлива, соотношения компонентов и др. [1—3]. Однако в этих работах не проанализировано влияние методов наложения ВЭП, что ограничивает разработку практических рекомендаций по интенсификации рабочего процесса в энергетических установках. В связи с этим задача данной работы — определение влияния способов наложения ВЭП на $v_{ср}$.

Экспериментальные исследования проводились на бунзеновской горелке, корпус которой выполнен из металлической трубы длиной 265 мм с внутренним диаметром 28 мм. Для уменьшения неоднородности поля скоростей на входе в рабочую зону горелки устанавливается конфузорное сопло с выходным диаметром 10 мм, на котором осуществляется стабилизация пламени. В качестве топлива используется предварительно перемешанная смесь пропана с воздухом, для измерения расходов которых применялись ротаметр РС-3А и дроссельная шайба соответственно. Относительная погрешность измерений расходов составляет 2,5 %.

В первой серии экспериментов реализована схема продольного поля. В этом случае ВЭП создавалось между соплом горелки и расположенным соосно соплу кольцевым электродом с внутренним диаметром 75 мм. В качестве основных варьируемых параметров приняты массовый расход пропана m_p и расстояние между электродом и срезом сопла горелки x . Отметим, что срыв пламени осуществлялся за счет постепенного увеличения массового расхода воздуха при фиксированном расходе пропана. Поэтому в каждом случае срыв пламени реализуется при конкретном значении коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ср}$. Обратим внимание, что во всех экспериментах факт интенсифицирующего воздействия ВЭП на процессы горения проверялся следующим образом. Если при наложении поля имела место стабилизация

© Д.А. Ягодников, А.В. Воронцовский, 1995