

А. В. Воронцовский, К. Ю. Арефьев,
М. А. Ильченко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЖРД МАЛОЙ ТЯГИ

Представлены результаты экспериментального исследования системы газодинамического воспламенения топливной смеси в ЖРД малой тяги. Принцип работы системы, состоящей из сверхзвукового сопла и резонатора с конфузурным входом, основан на реализации в ней циклического процесса прохождения в застойную зону резонатора ударных волн, генерируемых на входе в конфузур, что в конечном итоге приводит к диссипации кинетической энергии сверхзвуковой струи и интенсивному выделению теплоты. В работе экспериментально определены АЧХ системы, интенсивность тепловыделения в резонаторе и уровень температуры торцевой стенки.

E-mail: voron@mx.bmstu.ru; arefyev@rambler.ru; zvs@ciam.ru

Ключевые слова: система воспламенения, пульсации давления, газодинамический резонанс, экспериментальное исследование.

Работа является продолжением исследования [1] перспективной резонансной газодинамической системы воспламенения (ГСВ) применительно к жидкостным ракетным двигателям (ЖРД) малой тяги (МТ).

Газодинамический тракт ГСВ (рис. 1) состоит из сверхзвукового сопла 1 и полуоткрытого резонатора с конфузурным входом 2, установленных на одной оси. В застойной зоне А резонатора осуществляется интенсивный нагрев подаваемой через сопло газообразной топливной смеси. Выделение теплоты происходит за счет высокочастотного циклического процесса прохождения и отражения от торцевой стенки резонатора ударных волн. Высокий уровень температур в резонансной полости приводит к воспламенению топлива.

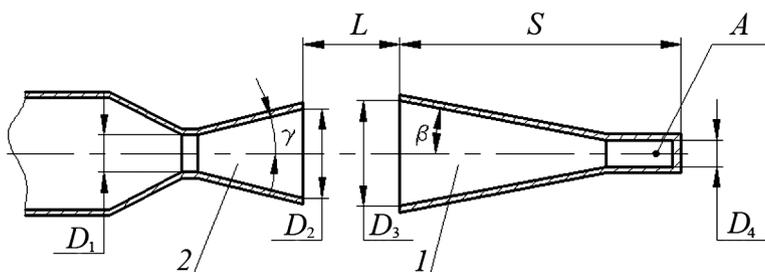


Рис. 1. Схема ГСВ:

1 — резонатор; 2 — сопло

Нагрев газа внутри резонансной полости происходит следующим образом [2, 3]. При обтекании газом входной кромки резонатора возникает поддерживаемый за счет энергии самого потока автоколебательный процесс. При этом генерируемые на входе в конфузор ударные волны с определенной частотой распространяются вдоль оси резонатора, проникая в застойную зону A . Процесс сопровождается ростом энтропии и необратимым выделением теплоты, которая аккумулируется в газе, находящемся в застойной зоне резонатора. Высокую интенсивность нагрева стенок резонатора можно объяснить тем, что во время цикла повышения давления и температуры газа в резонаторе часть теплоты из застойной зоны резонатора передается стенке.

В первой части исследования [1] был представлен расчетно-теоретический анализ ГСВ применительно к ЖРД МТ. Проведенные расчеты показали, что изменение температуры газа в резонаторе имеет циклический характер и может превышать полную температуру подаваемой смеси T_0 более чем в 7 раз. При этом средняя температура достигает значений до $5,7T_0$. Таким образом, уровень температуры выше порога воспламенения газообразных топливных пар, применяемых в ЖРД МТ. Расчетное время запуска двигателя составляет не более 50 мс.

В [1, 4, 5] получены рекомендации по выбору основных геометрических параметров сопла и резонатора. Показано, что резонансный эффект, сопровождающийся максимальными температурами газа в резонаторе, наблюдается при частоте пульсаций $3...4$ кГц. Определены оптимальные соотношения между основными геометрическими параметрами ГСВ: $L = (2...3)D_1$ и $S = (12...14)D_1$.

В данной работе приведены результаты испытаний автономной ГСВ в атмосферных условиях с использованием модельного газа (воздуха) в качестве рабочего тела.

В задачи экспериментального исследования модельной ГСВ входят:

- 1) получение экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пульсационного процесса в ГСВ;
- 2) исследование процесса прогрева конструкции резонатора ГСВ и определение уровня тепловыделения в резонансной полости;
- 3) определение влияния дроссельных характеристик ГСВ на процесс нагрева газа в застойной зоне резонатора;
- 4) сравнительный анализ экспериментальных данных и расчетных зависимостей, полученных в работе [1].

При проведении экспериментального исследования в качестве параметров рассматривали давление перед соплом, глубину резонансной полости S и относительное положение резонатора L . Эффективность работы ГСВ оценивали по максимальной температуре нагрева торцевой части резонатора и по тепловыделению в застойной зоне резонансной полости.

Экспериментальные исследования модельного варианта ГСВ выполнены на стенде У310 ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» с использованием установки, в состав которой входят воздушная рампа высокого давления (с заправочной, запорной арматурой и дренажными устройствами), основной и командный редукторы давления. Установка оборудована датчиками температуры и давления воздуха на входе, теневым прибором ИАБ-451 с высокоскоростной видеокамерой, микрофоном RFT МК 101, анализатором акустических сигналов ONO SOKKY CF-920, тепловизором SDS HotFind-DXT. Хранение и первичная обработка информации осуществляются модулем Л-КАРД.

Сверхзвуковое сопло модельного варианта ГСВ имеет геометрическую степень расширения, равную четырем. Для экспериментальных исследований изготовлено два резонатора с относительной глубиной резонансной полости $S/D_1 = 13$ и $S/D_1 = 15$. Расстояние между соплом и резонатором варьируется в диапазоне значений $L/D_1 = 0...6$.

Испытания проведены при изменении давления газа перед соплом p_v в диапазоне $p_v/p_n = 1,4...25$, где p_n — давление окружающей среды.

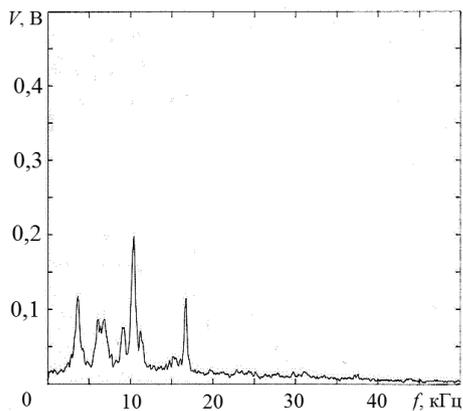
С помощью анализатора ONO SOKKY CF получены АЧХ пульсационного процесса в ГСВ. На рис. 2 приведены результаты измерений электрического сигнала V для дозвукового, трансзвукового и сверхзвукового режимов течения в сопле.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением значения p_v/p_n при докритическом режиме течения частота пульсаций в резонаторе (соответствующая спектральной составляющей с максимальной амплитудой) асимптотически стремится к значению, равному $f = 0,25a/S$, где a — осредненная скорость звука по длине резонатора.

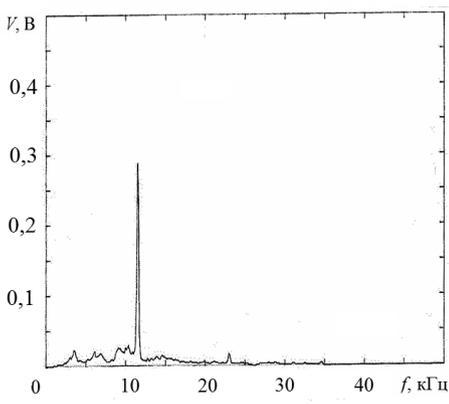
При сверхкритическом перепаде давления параметры p_v/p_n и L не оказывают влияния на частоту пульсаций в резонаторе. Примеры зависимостей частоты от p_v/p_n для $S/D_1 = 13$ и $S/D_1 = 15$ приведены на рис. 3, а.

О влиянии перепада давления p_v/p_n на величину звукового воздействия $L_{зв}$ можно судить по данным рис. 3, б: имеет место значительный рост значений $L_{зв}$ при повышении относительного перепада давления до $p_v/p_n = 8...10$ и последующее асимптотическое приближение к максимальному значению. В исследованном диапазоне изменения $S/D_1 = 13...15$ не обнаружено заметного влияния параметра S на величину звукового воздействия.

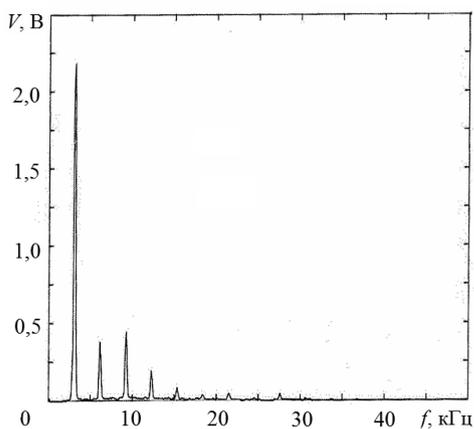
При значениях $p_v/p_n < 5$ в спектрах звукового воздействия наибольшие амплитуды зарегистрированы у высших гармоник. С возрастанием относительного перепада давления наибольшие амплитуды спектральных составляющих смещаются в область первых гармоник с частотами, близкими к значениям, которые определяются зависимостью $f = 0,25a/S$. По достижению $p_v/p_n = 8...10$ существенно возрастает уровень звукового давления (у гармоник с наибольшей амплитудой) с последующим асимптотическим приближением к максимальным значениям, находящимся в диапазоне $L_{зв} = 110...130$ дБ.



a

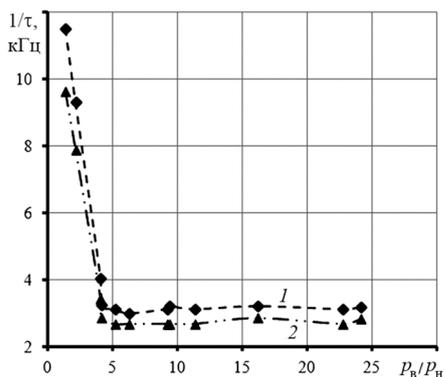


б

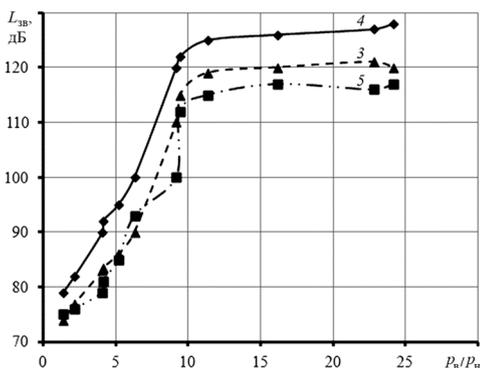


в

Рис. 2. АЧХ пульсационного процесса при $p_{в}/p_{н}=1,4$ (*a*), $p_{в}/p_{н}=2,1$ (*б*) и $p_{в}/p_{н}=25$ (*в*)



a



б

Рис. 3. Зависимость частоты пульсаций (*a*) и величины звукового воздействия (*б*) от относительного перепада давления на сопле ГСВ:

1 — $S/D_1 = 13$; 2 — $S/D_1 = 15$; 3 — $L/D_1 = 1$; 4 — $L/D_1 = 2$; 5 — $L/D_1 = 3$

В диапазоне $p_B/p_H = 2,1...24,2$ (рис. 4) максимальным значениям интенсивности звукового воздействия соответствуют $L/D_1 = 1,8...2,0$.

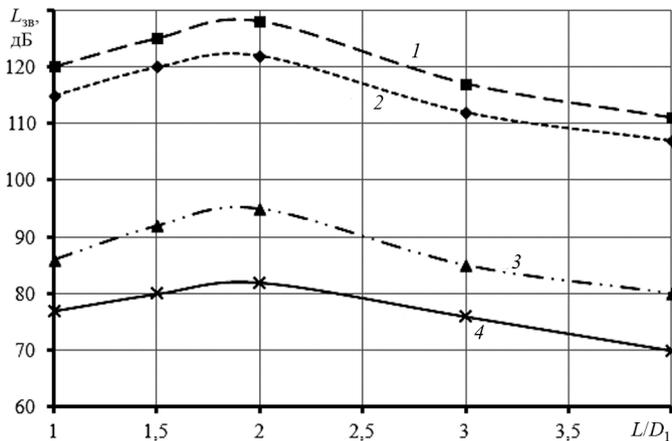


Рис. 4. Зависимость величины звукового воздействия $L_{зв}$ от относительного перепада давления на сопле ГСВ:

1 — $p_B/p_H = 24,2$; 2 — $p_B/p_H = 9,5$; 3 — $p_B/p_H = 5,2$; 4 — $p_B/p_H = 2,1$

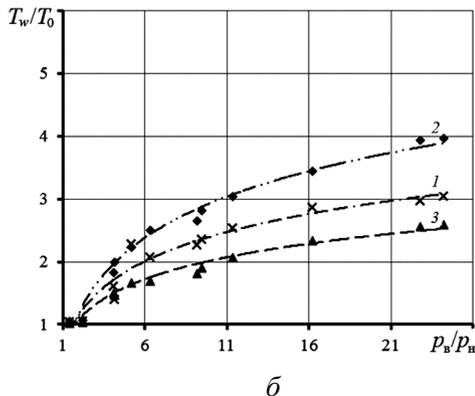
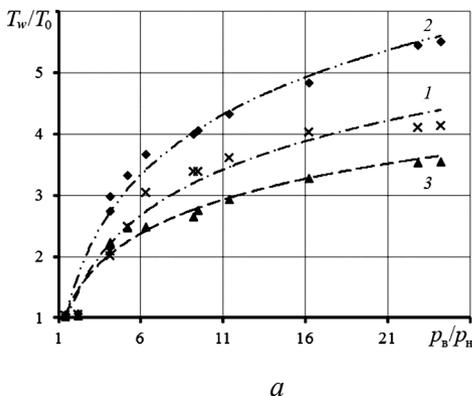


Рис. 5. Зависимость температуры торцевой стенки резонатора от относительного перепада давления на сопле ГСВ для $S/D_1 = 13$ (а) и $S/D_1 = 15$ (б):
1 — $L/D_1 = 1$; 2 — $L/D_1 = 2$; 3 — $L/D_1 = 3$

Данные исследований о влиянии относительного перепада давления p_B/p_H на степень нагрева торцевой части резонатора T_w/T_0 представлены на рис. 5: наблюдается корреляция зависимостей $T_w/T_0 = f(p_B/p_H)$ и $L_{зв} = f(p_B/p_H)$.

Полученные ранее расчетные данные [1] и результаты экспериментального исследования ГСВ имеют удовлетворительную сходимость в пределах относительной погрешности 10 %. Например, экспериментальные значения температуры торцевой стенки резонатора

T_w оказались ниже по сравнению с расчетными значениями средней температуры T в застойной зоне резонатора. Наблюдаемая разница обусловлена дополнительным теплоотводом в окружающую среду и корпус экспериментальной ГСВ.

В процессе эксперимента отмечено снижение температуры входной кромки резонатора до 235 К от начального значения (291 К) и повышение температуры его торцевой части до 1325 К. Выход резонатора на стационарный температурный режим осуществляется за 14...16 с.

Исследование прогрева стенок резонатора с помощью тепловизора позволило оценить тепловыделение Q в резонансной полости. Величину тепловыделения можно определить по уравнению

$$Q = \frac{F \int [\varepsilon \sigma T_p^4 + \alpha_k (T_p - T_{o.c.})] dF + \int \rho C \Delta T_p dV}{\Delta t}.$$

Здесь ε — коэффициент черноты наружной поверхности резонатора; σ — коэффициент Стефана — Больцмана; α_k — коэффициент конвективной теплопередачи в окружающую среду; T_p — температура конструкции резонатора; $T_{o.c.}$ — температура окружающей среды; ρ — плотность элементов конструкции резонатора; C — теплоемкость материала резонатора; F — площадь поверхности; V — объем конструкции резонатора.

Одним из параметров, по которому можно оценить эффективность работы ГСВ, является относительное тепловыделение Q/H_0 (отношение тепловыделения Q к полной энтальпии потока на входе в ГСВ). Зависимости $Q/H_0 = f(p_b/p_n)$ приведены на рис. 6.

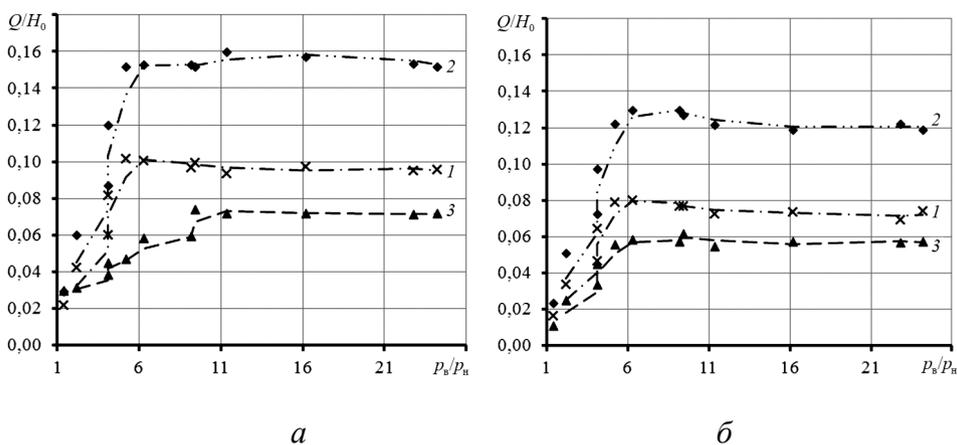


Рис. 6. Экспериментальная зависимость относительного тепловыделения в резонаторе от p_b/p_n для $S/D_1 = 13$ (а) и $S/D_1 = 15$ (б):

1 — $L/D_1 = 1$; 2 — $L/D_1 = 2$; 3 — $L/D_1 = 3$

В исследованных резонаторах величина Q/H_0 практически не зависит от перепада давления при $p_b/p_n > 6$. Причиной снижения относительного тепловыделения при $p_b/p_n < 10$ является увеличение степени нерасчетности сопла и соответствующее снижение скорости потока в системе сверхзвуковое сопло — резонатор. Тепловыделение в резонансной полости, в значительной степени обусловленное геометрическими параметрами ГСВ, достигает максимума при $L/D_1 = 2$, $S/D_1 = 12...14$, причем максимальному значению тепловыделения соответствует максимальная температура торцевой стенки резонатора.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования модельной резонансной системы газодинамического воспламенения ЖРД МТ. При штатной работе ГСВ температура газовой смеси в застойной зоне резонатора (вблизи его торца) превышает точку воспламенения.

Получены зависимости частоты f и уровня звукового воздействия $L_{зв}$ от относительного перепада давления p_b/p_n .

В процессе выхода ГСВ на стационарный режим работы наблюдается снижение температуры входной кромки резонатора до 235 К и повышение температуры его торцевой части до 1325 К.

Показано, что тепловыделение в исследованных резонаторах практически не зависит от перепада давления при $p_b/p_n > 10$ и может составлять до 16 % от полной энтальпии потока на входе. Максимальные значения интенсивности звукового воздействия $L_{зв} = 110...130$ дБ достигают при $L/D_1 = 1,8...2,0$.

В результате анализа АЧХ ГСВ установлено, что частота пульсаций не зависит от расстояния между соплом и входной частью резонатора, а также от перепада давления при $p_b/p_n > 5$. Для $S/D_1 = 13$ номинальная частота пульсаций составляет 3600 Гц, для $S/D_1 = 15$ — 3100 Гц.

Полученные экспериментальные данные подтвердили возможность применения ГСВ для запуска ЖРД МТ на газообразных компонентах топлива. Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о высокой точности описания процессов в ГСВ математической моделью [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю., Захаров В.С. Расчетно-теоретическое исследование резонансной системы газодинамического воспламенения ЖРД малой тяги // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 1. С. 31–41.
2. Ляхов В.Н., Поддубный В.В., Титаренко В.В. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкции: Математическое моделирование в нестационарной газовой динамике. М.: Машиностроение, 1989. 392 с.
3. Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

4. Сергиенко А.А., Семенов В.В. Газодинамический воспламенитель // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 2. С. 44–47.
5. Иванов Э.И., Крюков И.А. Пульсационные режимы течения в газодинамическом воспламенителе // Математическое моделирование. 1999. Т. 11, № 2. С. 61–69.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012