

УДК 641.454.22

## **Экспериментальное исследование влияния акустико-вихревых автоколебаний на процесс разрушения недорасширенной сверхзвуковой струи в затопленном пространстве**

**В.Ю. Александров, К.Ю. Арефьев, М.А. Ильченко**

*Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова, Москва*

E-mail: alexandrov@ciam.ru, arefyev@ciam.ru, 012@ciam.ru

Интенсификация смешения подаваемого через струйные форсунки газообразного рабочего тела с окружающей средой является важной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить эффективность рабочего процесса в энергетических и силовых установках. Актуальным, однако малоизученным направлением является генерирование в струйных форсунках акустико-вихревых автоколебаний, способных ускорить распад сверхзвуковой струи и тем самым улучшить показатели смешения. В статье представлены особенности возбуждения акустико-вихревых автоколебаний в струйных форсунках; приведены основные результаты экспериментального исследования модельной струйной форсунки, в канале которой установлены пластины, обеспечивающие возбуждение акустико-вихревых автоколебаний; найдены закономерности распада в затопленном пространстве недорасширенной сверхзвуковой струи для различных режимов течения. Представленные данные показывают возможность эффективного применения струйных форсунок с генерируемыми акустико-вихревыми автоколебаниями применительно к системам подачи газообразного горючего. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании энергосиловых установок перспективных образцов авиационно-космической техники и технологических устройств.

**Ключевые слова:** слой смешения, струйная форсунка, акустико-вихревые автоколебания, спектральная характеристика, ударно-волновая структура.

### **Введение**

Развитие авиационно-космической техники сопровождается разработкой перспективных энергосиловых и двигательных установок. Одним из актуальных направлений является создание прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), обеспечивающих движение летательного аппарата (ЛА) с высокими сверхзвуковыми и гиперзвуковыми скоростями [1]. Важную роль в ПВРД играет эффективность рабочего процесса, которая сильно зависит от полноты сгорания топливной смеси внутри камеры сгорания (КС).

Расчетно-экспериментальные данные [2, 3] показывают, что добиться высокой полноты сгорания топливной смеси позволяет подача в КС горючего в газообразном состоянии. Газификация жидкого горючего (керосина, этанола и др.) может происходить в каналах регенеративной системы охлаждения КС [4], в то время как перевод в газообразное состояние твердых типов горючего [5] происходит в газогенераторах путем разложения

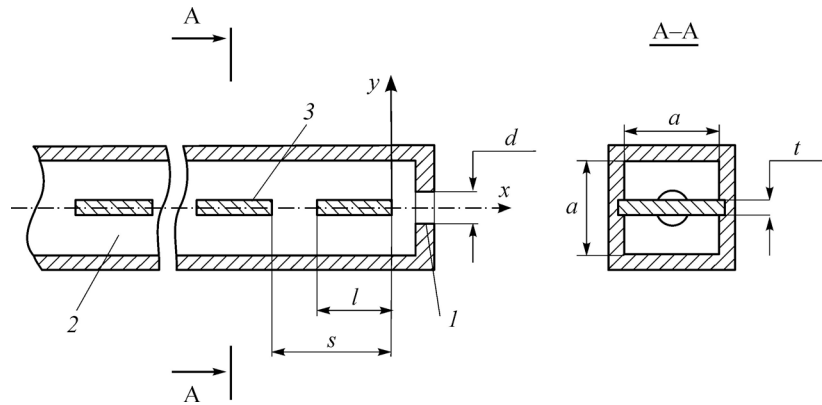


Рис. 1. Схема струйной форсунки.  
1 — сопло, 2 — полость, 3 — пластины.

или предварительного сжигания [6]. Определенный интерес представляет использование газообразного водорода [7, 8], хранящегося на борту ЛА под высоким давлением (более 70 МПа). Следует отметить, что подача газообразного топлива в КС в большинстве известных конструкций ПВРД осуществляется через спутно направленные с основным потоком струйные форсунки, в которых реализуется сверхкритический перепад давления.

Накладываемые массогабаритные ограничения во многих случаях приводят к необходимости уменьшения длины КС ПВРД. При этом достижение высокой полноты сгорания топливной смеси может быть обеспечено при максимально равномерном смешении газифицированного горючего с воздушным потоком в КС [9]. Ввиду вышесказанного важной научно-технической задачей становится интенсификация смесеобразования газообразного горючего с воздушным потоком. Одним из возможных путей ее решения является генерирование в струйных форсунках акустико-вихревых автоколебаний, которые ускоряют распад сверхзвуковой струи и улучшают показатели смесеобразования горючего с воздушным потоком [10].

Перспективным методом возбуждения акустико-вихревых автоколебаний в струйных форсунках (рис. 1) является формирование перед соплом 1 диаметром  $d$  полости квадратного поперечного сечения 2 с высотой  $a$ , где расположено  $N$  периодически установленных (с шагом  $s$ ) поперечных пластин 3 толщиной  $t$  и длиной  $l$  [10].

Целью настоящей работы является получение экспериментального подтверждения эффективности применения струйных форсунок, в которых генерируются акустико-вихревые автоколебания, и определение основных закономерностей распада формируемой в затопленном пространстве недорасширенной сверхзвуковой струи.

### Описание экспериментальной установки

В работе проведено экспериментальное исследование модельной струйной форсунки (МСФ), фотография которой приведена на рис. 2. МСФ состоит из корпуса 1, входного канала 2, полости 3 с периодически установленными пластинами 4 и крышки 5. В крышке 5 выполнено цилиндрическое сопло 6. Относительные размеры и расположение пластины в полости МСФ выбраны на основе предварительных расчетов [10]. При этом реализованы следующие соотношения:  $d/a = 0,5 \div 0,7$ ,  $l/a = 1,25$ ,  $s/a = 1,45$ . Относительная толщина пластин, установленных в полости МСФ, составляет  $t/a = 0,75$  мм при их количестве  $N = 6$ .

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой представлена на рис. 3. В качестве рабочего тела использовался воздух. Установка состоит из рампы высокого давления 1 с запорной арматурой и дренажными устройствами, редуктора давления 2 с командным редуктором 3, МСФ 5. На воздушной линии

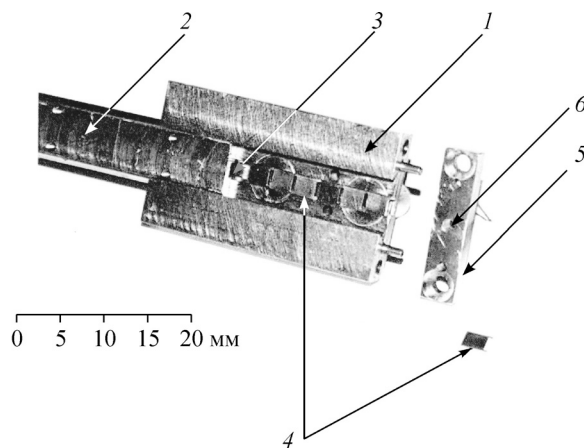


Рис. 2. Фотография МСФ в разобранном состоянии.

1 — корпус, 2 — входной канал, 3 — полость,  
4 — периодические пластины, 5 — торцевая пластина, 6 — сопло.

перед МСФ установлен датчик давления 4, последовательно соединенный с модулем сбора данных 12 и устройством хранения и обработки информации 13. В камере МСФ расположен датчик пульсаций давления 6, который подключен через усилитель сигнала 7 к анализатору 8. Система визуализации структуры течения состоит из осветительной 9 и приемной 10 частей теневого прибора ИАБ-451, а также регистратора видеосигнала 11.

Используемое оборудование позволяет в процессе экспериментов с помощью теневого метода регистрировать структуру течения, формируемую струей рабочего тела, а также осуществлять замеры давления и пульсаций давления в полости МСФ. Представленный ниже анализ полученных данных дает возможность установить влияние амплитуды и частоты колебаний в полости на интенсивность смесеобразования сверхзвуковой струи с атмосферным воздухом.

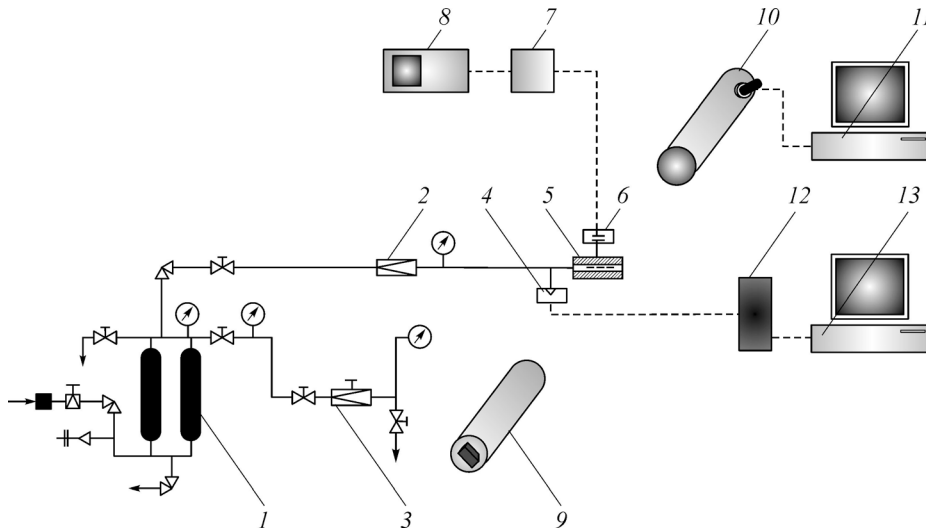


Рис. 3. Схема установки и система измерений для экспериментального исследования МСФ.

1 — рама высокого давления, 2 — редуктор давления, 3 — командный редуктор, 4 — датчик давления,  
5 — экспериментальный объект, 6 — датчик пульсаций давления, 7 — усилитель сигнала,  
8 — анализатор сигналов, 9 — осветительная часть теневого прибора, 10 — приемная часть теневого прибора,  
11 — регистратор видеосигнала, 12 — модуль сбора данных, 13 — устройство хранения  
и обработки информации.

### Результаты экспериментов и анализ полученных данных

Процесс течения струи (рис. 4) на режимах недорасширения основного потока *1* характеризуется тем, что за срезом МСФ *2* образуется ударно-волновая структура (УВС), особенности которой детально описаны в работах [11–14]. Расширение газа за срезом сопла происходит в центрированной волне разрежения *3*, которая взаимодействует со свободной границей струи *4* и образует волну сжатия *5*. Граница струи при этом отклоняется к ее оси. Волны сжатия формируют висячий скачок уплотнения *6*. Отражение от оси струи скачка уплотнения приводит к образованию диска Маха *7*. За отраженным скачком газ имеет, как правило, сверхзвуковую скорость, а за прямым скачком — дозвуковую. Отраженный скачок уплотнения *8* взаимодействует с границей струи и отражается от нее веером волн разрежения. В результате подобного взаимодействия создаются условия, соответствующие образованию повторной бочкообразной структуры меньшей интенсивности. Таким образом, появляется последовательность повторяющихся, постепенно размывающихся при удалении от среза сопла элементов УВС, сопровождающихся образованием области *9*, в которой наблюдается турбулентный режим смешения [12, 14], характерный для потоков с низким градиентом давления.

При обтекании пластин, установленных в канале перед соплом, в потоке возбуждается дискретная составляющая колебаний давления, появление которой связано с периодическим образованием и отрывом крупномасштабных вихревых структур в турбулентном следе за пластинами. При отрыве вихрей на поверхности пластины происходит перераспределение давления, приводящее к появлению действующей на поток поперечной периодической силы, которая в течение каждого полупериода направлена в сторону оторвавшегося вихря. Частота действующей силы определяется формулой [15]:

$$f = St \cdot M \cdot c / t,$$

здесь *M* — число Маха потока в полости, *c* — скорость звука. Число Струхала для пластины в диапазоне чисел Рейнольдса  $10^2 < Re < 5 \cdot 10^5$  составляет  $St \approx 0,2$  [15].

Воздействие таких дискретных составляющих колебаний давления при срыве вихрей в случае, если их частота близка к одной из собственных акустических частот колебаний газа в полости с размещенными в ней пластинами, может являться причиной возникновения автоколебаний в потоке газа. Причем амплитуда таких автоколебаний будет существенно превышать амплитуду колебаний при срыве вихрей с периодически установленных пластин в неограниченном пространстве.

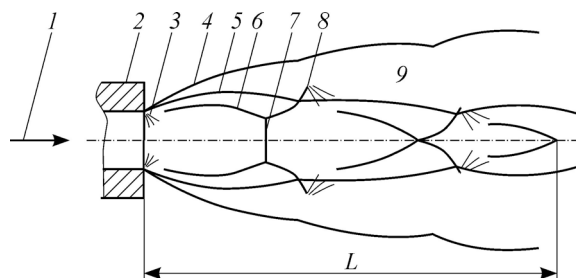


Рис. 4. УВС струи на режиме недорасширения.

*1* — основной поток, *2* — МСФ, *3* — центрированная волна разрежения,  
*4* — граница струи, *5* — волна сжатия, *6* — висячий скачок уплотнения, *7* — диск Маха,  
*8* — отраженный скачок уплотнения, *9* — внешняя область смешения.

Результаты расчетов и экспериментов [13] показывают, что при наличии пластины в полости пространственное распределение амплитуды колебаний давления имеет более сложную структуру, чем в гладком канале. Наличие пластины в полости приводит к тому, что мода колебаний в области, занятой пластинами, соответствует продольным колебаниям, а вне пластин — экспоненциально затухающим поперечным колебаниям (стоячие волны) с узлом давления на оси канала и нулевыми скоростями на стенках полости. В поперечном сечении, где установлена пластина, может быть получено симметричное или несимметричное продольное распределение амплитуды колебаний давления относительно центра пластины. Приведенные в работе [13] соотношения для расчета частот собственных мод колебаний газа  $f$  в полости в зависимости от отношения длины пластины к высоте полости определяются выражениями:

$$\frac{f/f_m}{\sqrt{1-(f/f_m)^2}} = \begin{cases} \operatorname{ctg}\left(\frac{f}{f_m} \cdot \frac{\pi \cdot (2m-1)}{2} \cdot \frac{l}{a}\right), & \text{если } \frac{(2m-1)l}{a} < 1, \\ -\operatorname{tg}\left(\frac{f}{f_m} \cdot \frac{\pi \cdot (2m-1)}{2} \cdot \frac{l}{a}\right), & \text{если } \frac{(2m-1)l}{a} > 1, \end{cases}$$

здесь,  $f_m = (2m-1) \cdot c / (2a)$  — характерная частота поперечных колебаний газа в полости без пластины (с нулевой амплитудой давления на оси и нулевыми скоростями на стенках полости),  $c$  — скорость звука газа в полости,  $m = 1, 2 \div N$  — номер собственной поперечной моды.

Следует отметить, что несимметричное распределение реализуется только при условии  $(2m-1) \cdot l/a > 1$ , а частота колебаний при этом определяется функцией  $-\operatorname{tg}$  в правой части уравнения.

Результаты экспериментов [16] показывают, что амплитуда колебаний в полостях с двумя или тремя пластинами, расположенными с некоторым шагом  $s$ , существенно выше, чем в полости с одной пластиной. Возможное объяснение этого факта может состоять в следующем. Генерацию колебаний давления при обтекании пластин в полости можно рассматривать как явление возбуждения автоколебаний с различными механизмами обратной связи. В работе [13] для полости с одной пластиной была предложена схема обратной связи, согласно которой колебания поперечной акустической скорости в окрестности задней кромки пластины через некоторое время запаздывания  $\tau$  приводят к образованию акустического дипольного источника вследствие попеременного отрыва вихрей с разных сторон пластины. В полости с пластинами, установленными с определенными интервалами, возможен дополнительный резонансный механизм генерации колебаний. Согласно этому механизму взаимодействие вихрей, образующихся за задней кромкой пластины и движущихся вниз по потоку, с передней кромкой последующей пластины порождает акустические волны, которые могут распространяться навстречу потоку. Воздействие акустических волн на неустойчивый слой сдвига непосредственно у задней кромки пластины может интенсифицировать вихреобразование, которое в свою очередь может усилить акустические колебания.

Форма колебаний, при которой они локализованы вокруг пластины, обеспечивает достижение высоких уровней амплитуд звукового давления (до  $\sim 180$  дБ). Данный способ возбуждения мощных акустических автоколебаний в потоке газа не требует дополнительных внешних источников энергии, что обеспечивает высокую технологичность в случае его применения для интенсификации процессов смешения в потоках газа. Экспериментально полученные спектральные характеристики колебаний давления в полости МСФ представлены на рис. 5.

В случае отсутствия пластин сигнал, регистрируемый датчиком пульсаций давления в полости МСФ, имеет широкополосный спектр, характерный для турбулентных течений [17–19]. Максимальный уровень относительной амплитуды колебаний при этом

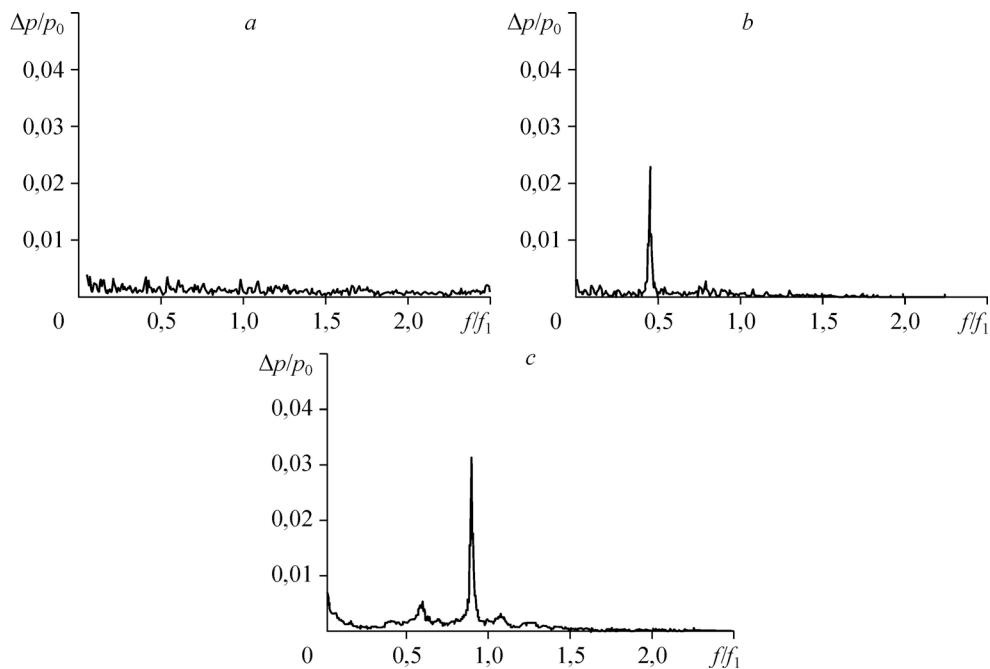


Рис. 5. Спектральная характеристика колебаний давления в полости. Без пластин (а), при симметричном распределении амплитуды колебаний давления (b), при несимметричном распределении амплитуды колебаний давления (с).

не превышает  $\Delta p/p_0 = 0,01$  (рис. 5а). Здесь  $p_0$  — осредненное по времени давление в полости.

В режиме самовозбуждения (при наличии в полости пластин, установленных с определенными интервалами) сигналы колебаний давления имеют характерный для резонансного режима вид (рис. 5b, 5c): спектральная характеристика содержит выраженную дискретную составляющую с высокими уровнями амплитуд колебаний давления [20]. Как отмечалось, в полости за пластинами распределение представляет поперечную моду с минимумом давления («узлом») на оси. При этом амплитуда экспоненциально затухает по длине полости МСФ. Это позволяет получить высокие уровни относительной амплитуды колебаний давления  $\Delta p/p_0 = 0,25 \div 0,35$  (рис. 5b, 5c) при малых потерях полного давления на их генерацию.

Следует отметить, что для несимметричного распределения зарегистрированные значения амплитуды колебаний достигают максимальных значений. Амплитуды спектральных пиков на частотах генерации автоколебаний в полости с пластинами могут превышать более чем в 2000 раз амплитуды спектральных составляющих широкополосного шума, регистрируемого в пустой полости. При этом проявление симметричного распределения характерно для скорости в полости, соответствующей  $M \sim 0,1$ , а несимметричного — для  $M \sim 0,2$ . В экспериментах изменение числа Маха в полости регулировалось изменением диаметра  $d$  сопла МСФ.

В случае симметричного распределения амплитуды колебаний давления относительное значение экспериментально зарегистрированных частот составляет  $f/f_1 = 0,52$ , а в случае несимметричного —  $f/f_1 = 0,91$ . Здесь  $f_1 = f_m$  при  $m = 1$ . Полученные значения достаточно хорошо совпадают с величинами расчетных частот (рис. 6), а также с экспериментальными данными для канала с одиночной пластиной. Сравнение результатов экспериментов с эмпирическими данными [13, 16], полученными для одиночной пластины в канале, показывает, что установка нескольких пластин, расположенных с определенной

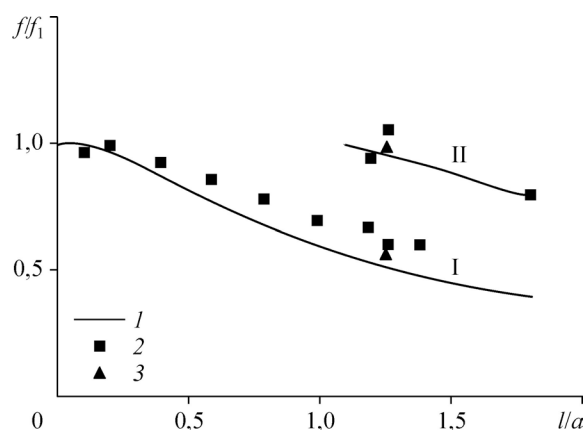


Рис. 6. Относительная частота колебаний давления в полости в случае симметричного (I) и несимметричного (II) распределений.

1 — расчетные значения, 2 — экспериментальные данные [12, 15] для одиночной пластины в канале, 3 — экспериментальные данные для нескольких пластин в канале.

периодичностью, позволяет в 2–3 раза увеличить относительную амплитуду пульсаций. При этом значения  $f/f_1$  практически не изменяются даже в случае существенного изменения размеров установки (в экспериментах [13] поперечные размеры полости в  $\sim 30$  раз превышали аналогичные размеры установки, представленной на рис. 2). Это свидетельствует о том, что механизм возбуждения автоколебаний при периодическом образовании и отрыве крупномасштабных вихревых структур в турбулентном следе за пластиной в канале сохраняется даже при существенном изменении размеров канала и значений  $f_1$ .

Согласно работам [13, 14], одним из индикаторов интенсивности смешения сверхзвуковой струи с окружающей средой является протяженность распада ее УВС, определяемая расстоянием  $L$  между срезом сопла МСФ и замыкающим висячим скачком уплотнения (рис. 4). Для обобщения полученных результатов удобно пользоваться относительной величиной протяженности УВС  $L/d$ . При этом наибольшая интенсивность смесеобразования соответствует минимальной относительной протяженности УВС. Таким образом, эффективность метода внешнего воздействия на процесс смешения струи с атмосферным воздухом акустико-вихревыми колебаниями в настоящей работе определена путем сравнения значений  $L/d$  для различных конфигураций МСФ и режимов ее работы.

Для определения  $L/d$  проведен анализ теневых фотографий течения, полученных при различных геометрических конфигурациях МСФ и реализации перепада давления  $p_0/p_h = 2,6 \div 6$ , где  $p_h$  — давление окружающей среды. Некоторые теневые фотографии приведены на рис. 7.

Полученные результаты для МСФ без пластин в полости соответствуют классическому представлению о структуре течения недорасширенной струи в затопленном пространстве [12, 13] с увеличивающимся в поперечном направлении турбулентным слоем смешения по мере удаления от среза сопла.

На рис. 8а показана зависимость  $L/d$  от  $p_0/p_h$  для различных режимов течения из МСФ. Представленные результаты позволяют провести сравнительный анализ эффективности смешения при реализации различных вариантов возбуждения автоколебаний. Для МСФ без пластин, установленных в полости с некоторым интервалом, УВС струи для рассматриваемого диапазона перепада давления имеет наибольшую относительную протяженность —  $L/d = 5 \div 8$ . Для режимов течения с генерацией акустико-вихревых автоколебаний, возникающих в полости МСФ при обтекании дозвуковым потоком пластин,

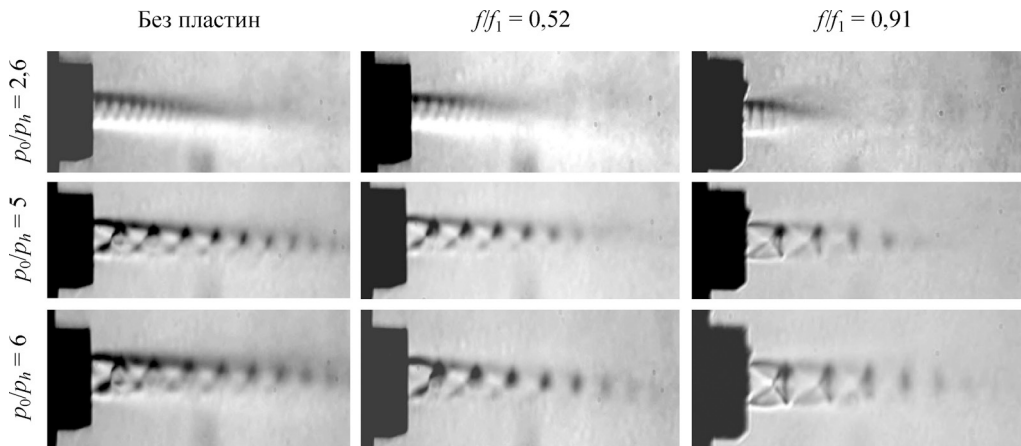


Рис. 7. Теневые фотографии для различных значений  $p_0/p_h$  и  $f$ .

установленных с некоторыми интервалами, относительная протяженность УВС сокращается в  $1,5 \div 1,9$  раза. Таким образом, для симметричного распределения амплитуды колебаний давления  $L/d = 4 \div 6,5$ , для несимметричного —  $L/d = 3,5 \div 5,5$ .

Следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне параметров величина  $L/d$  практически линейно зависит от относительного перепада давления в МСФ. При этом увеличение относительной амплитуды колебаний давления в полости позволяет снизить протяженность УВС. На рис. 8*b* представлена осредненная (для различных относительных перепадов давления в МСФ) зависимость  $L/L_0$  от  $\Delta p/p_0$ . Здесь  $L_0$  — протяженность УВС струи для МСФ без возбуждения акустико-вихревых автоколебаний. Согласно полученным данным, в диапазоне рассматриваемого относительного перепада давления при значении  $\Delta p/p_0 = 0,35$  может быть достигнуто практически двукратное снижение  $L$  относительно  $L_0$ .

Некоторое изменение структуры течения (рис. 9) наблюдается в случае установки части последней пластины непосредственно в сопле МСФ, что позволяет разделить его на два сектора. При малых относительных перепадах давления в МСФ происходит формирование течения с двумя струями (рис. 9*a*). Увеличение  $p_0/p_h$  приводит к их объединению (рис. 9*b*, 9*c*), однако протяженность УВС уменьшается на  $15 \div 25$  % относительно режима, соответствующего установке пластин внутри полости. Спектральный анализ сигналов колебаний давления в полости МСФ показал, что при заданной конфигурации возбуждаются автоколебания с частотами  $f/f_1 = 0,5 \div 0,7$ , что соответствует симметричному распределению амплитуды.

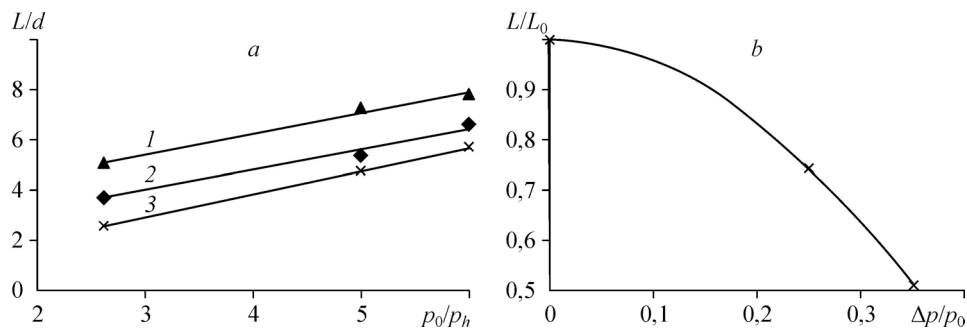


Рис. 8. Зависимость  $L/d$  от  $p_0/p_h$  (а) и  $L/L_0$  от  $\Delta p/p_0$  (б).

Без пластин (1),  $f = 18,3$  (2),  $31,7$  (3) кГц.



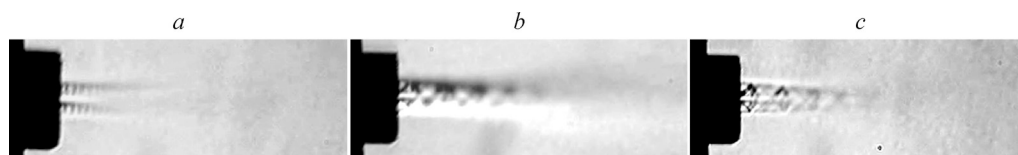


Рис. 9. Структура течения в случае установки части последней пластины непосредственно в сопле МСФ.  $p_0/p_h = 2,6$  (a), 6 (b, c).

Полученный эффект можно объяснить воздействием двух факторов. В случае, когда пластина разделяет сопло на два сектора, распределение амплитуды давления в сопле соответствует продольной моде акустических колебаний [13]. В этих условиях амплитуда больше, чем в том случае, когда в области за задней кромкой последней пластины и входом в сопло реализуется распределение в виде собственной поперечной моды колебаний с экспоненциально уменьшающейся от задней кромки к входному сечению сопла амплитудой. Другой механизм заключается в том, что пластина в выходном сечении делит сопло на два независимых сектора, каждый из которых может рассматриваться как отдельное сопло меньшей площади, чем исходное. Учитывая то, что характерные размеры УВС линейно зависят от диаметра сопла [17], величина  $L/d$  существенно уменьшается.

Представленные данные могут быть использованы при проектировании перспективных энергосиловых и двигательных установок образцов авиационно-космической техники.

### Выводы

На основе серии модельных экспериментов исследовано влияние акустико-вихревых автоколебаний на процесс размывания недорасширенной сверхзвуковой струи в затопленном пространстве.

Показано, что возбуждение в струйных форсунках акустико-вихревых автоколебаний позволяет увеличить интенсивность распада струи и тем самым повысить эффективность смешения. Отмечено, что одним из перспективных методов возбуждения акустико-вихревых автоколебаний в струйных форсунках является формирование перед соплом специальной полости, где расположены поперечные пластины, установленные с некоторым интервалом.

При возбуждении акустико-вихревых автоколебаний в полости перед струйными форсунками генерируются пульсации давления с симметричным или несимметричным распределением амплитуды в областях полости над и под пластинами. Симметричное распределение в исследуемой МСФ характеризуется относительной частотой колебаний давления  $f/f_1 = 0,52$ , несимметричное —  $f/f_1 = 0,91$ . При этом максимальные амплитуды колебаний давления соответствуют несимметричному распределению и могут составлять до 35 % относительно полного давления перед форсункой.

Анализ данных показывает, что для режимов течения с генерацией акустико-вихревых автоколебаний, возникающих в полости струйной форсунки при обтекании дозвуковым потоком пластин, установленных с некоторым интервалом, относительная протяженность струи сокращается в 1,5÷1,9 раза. Максимальная эффективность снижения относительной протяженности струи акустико-вихревыми автоколебаниями (до значений  $L/d = 3,5÷5,5$ ) отмечена для несимметричного распределения амплитуды колебаний давления. Дополнительное снижение протяженности распада струи на 15÷25 % может быть достигнуто в случае установки части последней пластины непосредственно в сопле струйной форсунки, разделяющей ее на два сектора.

Представленные данные позволяют сделать вывод о возможности интенсификации смешения путем воздействия на струю акустико-вихревыми колебаниями. Генерация автоколебаний может быть получена путем размещения в потоке пластин, установленных с некоторым интервалом, что является технологичным и конструктивно простым решением.

### Список литературы

1. Зуев В.С., Макарон В.С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 367 с.
2. Гуськов О.В., Копченев В.И. Численное исследование структуры течения в канале при сверхзвуковых условиях на входе // Аэромеханика и газовая динамика. 2001. № 1. С. 28–39.
3. Барановский С.И., Левин В.М., Надворский А.С., Турищев А.И. Экспериментально-теоретическое исследование спутных сверхзвуковых реагирующих струй // Междунар. школа-семинар «Турбулентные течения в реагирующих потоках». Минск: ИТМО АН БССР, 1986. С. 84–98.
4. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Воронцов А.В. Исследование эффективности регенеративной системы охлаждения сверхзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей на углеводородном горючем // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6, № 11. С. 489–495.
5. Цуцуран В.И., Петрухин Н.В., Гусев С.А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив: учеб. М.: МО РФ, 1999. 332 с.
6. Дулепов Н.П., Котенков Г.К., Яновский Л.С. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2001. Т. 6, № 2. С. 1–21.
7. Воронцов С.С., Забайкин В.А., Пикалов В.В., Третьяков П.К., Чугунова Н.В. Исследование структуры диффузионного факела водорода в сверхзвуковой высокоэнтальпийной струе воздуха // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 5. С. 3–5.
8. Виноградов Л.Г., Семенов В.Л., Шихман Ю.М. К 15-летию первого в мире летного испытания ГПВРД на жидком водороде // Двигатель. 2006. Т. 48, № 6. С. 28–29.
9. Мещеряков Е.А., Сабельников В.А. Роль смешения и кинетики в уменьшении тепловыделения при сверхзвуковом горении перемешанных газов в расширяющихся каналах // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 5. С. 23–32.
10. Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
11. Губанов Д.А. Влияние микроструй на структуру и акустическое излучение сверхзвуковой недорасширенной струи. Дисс. к. ф-м. н. Новосибирск, 2014. 140 с.
12. Пьянков К.С. Численное моделирование особенностей течений идеального газа и двухфазных смесей газа с частицами. Дисс. к. ф-м. н. Москва, 2011. 211 с.
13. Ильченко М.А., Крютченко В.В., Мнацаканян Ю.С. Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов. М: Машиностроение, 1995. 320 с.
14. Авдудевский В.С., Ашратов Э.Д., Иванов А.В., Пирумов У.Г. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй. М.: Машиностроение, 1989. 320 с.
15. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 207 с.
16. Фоломеев Е.А., Ильченко М.А., Селин Н.И. Интенсификация теплообмена в каналах при автоколебаниях газового потока // Изв. РАН. Энергетика. 1995. № 4. С. 151–159.
17. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
18. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 232 с.
19. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
20. Еремин Г.И., Кондратьев В.И. Акустическое воздействие на течение и спектр шума сверхзвуковых струй // Аэроакустика. М.: Наука, 1980. С. 119–123.

*Статья поступила в редакцию 14 апреля 2015 г.,  
после переработки — 18 августа 2015 г.*