

УДК 621.453/.457

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАЛОГАБАРИТНЫХ ОГНЕВЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ ВОЗДУХА

В. Ю. Александров^{1,2}, К. Ю. Арефьев^{1,2,3}, М. А. Ильченко¹

¹Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва
aleksandrov@rtc.ciam.ru, arefyev@ciam.ru

²Московский физико-технический институт (государственный университет), 117303 Москва

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва

Приведены результаты расчетно-экспериментального исследования пульсационных процессов в камерах сгорания малогабаритных огневых подогревателей воздуха. Представлены методы прогнозирования и экспериментального определения закономерностей изменения спектральных характеристик пульсаций давления в камере сгорания в номинальном режиме. Полученные данные могут быть использованы при отработке различных огневых подогревателей, в том числе предназначенных для испытаний камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей перспективных летательных аппаратов.

Ключевые слова: огневой подогреватель, высокоэнтальпийный поток, эксперимент, пульсации давления, акустическая проводимость, спектральная характеристика.

DOI 10.15372/FGV20160407

ВВЕДЕНИЕ

При испытаниях прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) перспективных летательных аппаратов большое внимание уделяется экспериментальному исследованию характеристик рабочего процесса в камере сгорания (КС) ПВРД. Наиболее распространенными являются испытания, проводимые по схеме присоединенного воздухопровода, которые требуют условий на входе, максимально приближенных к натурным. При этом необходимо обеспечить заданные температуру торможения T_0 , число Маха M_0 и полное давление p_0 воздушного потока во входном сечении. Достижение температуры $T_0 = 1000 \div 2000$ К в огневом подогревателе (ОП) воздуха можно получить путем прямого сжигания какого-либо горючего в КС ОП с компенсацией кислородного баланса.

Ввиду строгих массогабаритных ограничений, накладываемых условиями испытаний КС ПВРД и используемым стендовым оборудованием, в ряде случаев требуется снижение размеров и массы ОП (для стендов с силоизмерительными системами и стендов с ограничен-

ной рабочей зоной).

При использовании малогабаритных ОП возможны проблемы, связанные с обеспечением устойчивого рабочего процесса. В большинстве случаев подобные проблемы могут быть выявлены и решены непосредственно на этапе стендовой отработки малогабаритных ОП.

Следует отметить, что при работе малогабаритных ОП согласно заданной циклограмме испытаний возникают переходные процессы, вызванные изменением давления и температуры рабочего тела. Появляющиеся при этом колебания давления могут приводить к развитию неустойчивости рабочего процесса как в самом ОП, так и в КС исследуемого ПВРД [1, 2].

Таким образом, обеспечение устойчивости рабочего процесса в малогабаритном ОП является важной научно-технической задачей, решение которой необходимо для надлежащего проведения испытаний с имитацией условий, максимально приближенных к натурным при работе КС ПВРД. В статье представлены методы прогнозирования и экспериментального определения закономерностей изменения спектральных характеристик пульсаций давления в камере сгорания малогабаритного ОП.

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Малогобаритные ОП, используемые для испытаний КС ПВРД, могут различаться компонентами рабочего тела, системами их подачи, смешения и воспламенения, а также конфигурацией проточного тракта. Наиболее приемлемой для условий испытаний КС ПВРД является схема малогобаритного ОП, представленная на рис. 1. Подобная конфигурация позволяет достигать высокой эффективности работы ОП при использовании в качестве горючего как водорода, так и газообразных или жидких углеводородов.

Принцип действия ОП, в том числе и малогобаритного, заключается в следующем. Поступающий из системы подачи воздух смешивается с кислородом в смесительной камере. При этом для повышения равномерности распределения кислорода по сечению используется специальное устройство его распыла. Далее по потоку в распределителе компонентов (называемых также форсуночными или смесительными головками) через форсунки осуществляется подача горючего в кислородно-воздушный поток. После инициирования рабочего процесса воспламенителем происходит сгорание смеси в КС ОП с образованием высокоэнтальпийного рабочего тела с заданными параметрами и химическим составом. Следует отметить, что пламя стабилизируется вблизи распределителя компонентов в формируемых отрывных течениях. Далее рабочее тело через стендовое сопло и переходник подается к экспериментальному объекту.

В большинстве случаев соотношение ком-

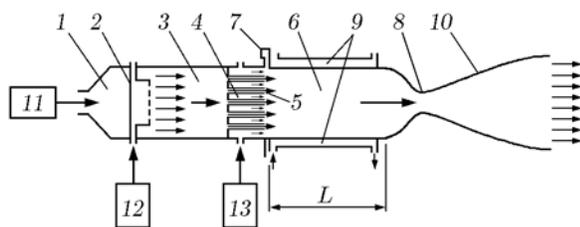


Рис. 1. Схема малогобаритного ОП:

1 — входной участок, 2 — устройство распыла кислорода, 3 — смесительная камера, 4 — распределитель компонентов, 5 — форсунки, 6 — камера сгорания, 7 — воспламенитель, 8 — сопло, 9 — система охлаждения, 10 — стендовый переходник, 11 — система подачи воздуха, 12 — система подачи кислорода, 13 — система подачи горючего

понентов рабочего тела ОП выбирается таким, чтобы после полного их сгорания массовая концентрация кислорода в высокоэнтальпийном воздушном потоке максимально соответствовала его содержанию в воздухе, а полная температура или полная энтальпия потока соответствовала параметрам полета летательного аппарата.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Источником пульсаций давления в объеме КС малогобаритного ОП могут быть процессы горения, вихревые турбулентные течения, реализующиеся непосредственно вблизи распределителя компонентов при взаимодействии вытекающих через форсунки струй, а также генерируемое этими струями нестационарное акустическое поле. При воздействии на газовый объем КС ОП турбулентных пульсаций давления, возникающих в камере при горении, зарегистрированный в любой точке объема спектр сигнала пульсаций давления (отклик) может достигать максимума на частотах, которые соответствуют либо максимуму спектра воздействия, либо максимуму модуля амплитудно-частотной характеристики газа в КС [3, 4]. Увеличение амплитуды спектральных составляющих по сравнению с исходным холодным течением является следствием возрастания турбулентных пульсаций в потоке реагирующего газа в КС [5, 6] и колебаний фронта пламени [7, 8], т. е. связано с ростом интенсивности воздействия.

Для КС ОП, как слабодемпфированной динамической системы, максимум модуля амплитудно-частотной характеристики практически совпадает с частотами, соответствующими собственным формам колебаний [1, 2]. Как правило, вблизи этих частот могут находиться максимумы спектральных амплитуд пульсаций давления в КС ОП, под воздействием которых в камере может возникнуть резонанс газового объема, приводящий к неустойчивому рабочему процессу. Поэтому определение частот и собственных форм акустических колебаний газа в объеме камеры малогобаритного ОП является одной из основных задач организации в ней эффективного и устойчивого горения.

Для определения возможных частот собственных продольных колебаний газа в цилиндрической КС ОП проведем аналитическое ис-

следование. В общем случае частота и амплитуда первой продольной акустической моды колебаний могут зависеть от акустической проводимости в граничных сечениях и от длины камеры L (см. рис. 1), а также от теплофизических и газодинамических характеристик рабочего тела (скорости звука и числа Маха) в тракте ОП.

Граничные условия задаются в виде значений безразмерной комплексной акустической проводимости $\eta = \text{Re}(\eta) + i\text{Im}(\eta)$ [1, 2]. Для камеры ОП такими границами являются поверхность распределителя компонентов и входное сечение сверхзвукового сопла (см. рис. 1). Акустическая проводимость граничных поверхностей может влиять на затухание колебаний давления в КС ОП. Рассматривая изменение пульсаций давления при горении в камере ОП как колебательный процесс в динамической системе, можно найти его характеристики. Из решения задачи о свободных затухающих акустических колебаниях в объеме КС при теплофизических и газодинамических параметрах, соответствующих термодинамически равновесному рабочему телу, и различной степени демпфирования может быть получена оценка амплитудно-частотной характеристики [1, 4]. С этой целью рассмотрим задачу о распространении одномерных колебаний в потоке с постоянной средней скоростью в тракте ОП. Данный процесс описывается волновым уравнением для акустического потенциала φ :

$$(1 - M^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{2M}{c} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Здесь c — скорость звука, M — число Маха потока, x, t — пространственная и временная координаты.

Для гармонических, экспоненциально затухающих во времени колебаний уравнение (1) решается методом разделения переменных:

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) &= \Phi(x) \exp(-st) = \\ &= (A^+ \exp(K^+ x) + A^- \exp(K^- x)) \exp(-st), \quad (2) \end{aligned}$$

где $s = \gamma + i\omega$, γ — коэффициент затухания, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота колебаний. В уравнении (2) первое слагаемое определяет волну, распространяющуюся по потоку (в положительном направлении оси x), второе — против потока. При этом константы распространения определяются следующим образом:

$$K^+ = \frac{s}{c(1+M)}, \quad K^- = -\frac{s}{c(1-M)}. \quad (3)$$

Граничные условия во входном ($x = 0$) и выходном ($x = L$) сечениях задаются в виде безразмерных комплексных акустических проводимостей этих поверхностей:

$$\eta_0 = \rho c \frac{V_a(0)}{p_a(0)}, \quad \eta_L = \rho c \frac{V_a(L)}{p_a(L)}. \quad (4)$$

Здесь ρ — плотность газа, акустические давление p_a и скорость V_a связаны с потенциалом φ соотношениями

$$\begin{aligned} p_a(x, t) &= -\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + Mc \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \\ V_a(x, t) &= \frac{\partial \varphi}{\partial x}. \end{aligned} \quad (5)$$

Соотношения (4) преобразуются в систему линейных однородных уравнений для нахождения постоянных A^+ и A^- , входящих в (2). Условием существования отличных от нуля решений является равенство нулю определителя системы, из которого находятся коэффициенты затухания и частоты, соответствующие различным продольным модам акустических колебаний газа в камере ОП:

$$\begin{aligned} (1 + \eta_0)(1 - \eta_L) \exp(K^+ L) - \\ - (1 - \eta_0)(1 + \eta_L) \exp(K^- L) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

При заданных значениях η_0 и η_L полученные из решения уравнений (6) значения частот и коэффициентов затухания определяют амплитудно-частотную характеристику ОП и, следовательно, частоты спектральных пиков с максимальной амплитудой. Определение реальных значений акустических проводимостей η_0 и η_L , которые в общем случае зависят от частоты колебаний и конкретной конструктивной формы проточного тракта ОП, требует детального экспериментального исследования. Условия затухания колебаний ($\gamma > 0$) накладывают определенные ограничения на акустическую проводимость. Входное сечение в ОП конструктивно аналогично форсуночной (смесительной) головке жидкостного реактивного двигателя, для которых известно [5], что диссипация акустической энергии происходит в вихревых турбулентных течениях в зонах соприкосновения струй обратных токов с поверхностями корпуса КС и форсуночной головки, а

также при взаимодействии друг с другом струй газа, истекающих через отверстия в форсуночной головке. В сечении на входе в сужающуюся часть сопла ($x = L$) акустическая проводимость зависит от частоты колебаний, геометрической формы сопла и параметров течения на входе в сопло.

Примеры расчетных и экспериментальных результатов по определению акустической проводимости сопел при продольных колебаниях приведены в [2]. При определении граничных условий учитывается, что вещественная часть проводимости в сечении входа будет отрицательной, $\text{Re}(\eta_0) < 0$, а в сечении выхода перед началом сужения сопла — положительной, $\text{Re}(\eta_L) > 0$. При таких условиях колебания затухают. Это происходит и в движущейся среде при небольших значениях числа Маха M [1, 2], в частности для КС ОП, где обычно $M < 0.1$.

Акустические проводимости η_0 и η_L являются комплексными величинами и поэтому, согласно (4), зависят от отношения максимальных амплитуд колебаний акустических скорости и давления, а также от фазового сдвига между этими колебаниями. В общем случае необходимо учитывать одновременное влияние вещественной и мнимой частей акустических проводимостей на амплитудно-частотную характеристику КС ОП, но расчетные оценки показывают, что частота колебаний первой продольной моды остается практически постоянной при изменении вещественной части проводимостей в диапазонах $-1 < \text{Re}(\eta_0) < 0$ и $0 < \text{Re}(\eta_L) < 1$. Во входном сечении ($x = 0$) по результатам предварительных оценок принималось $\text{Re}(\eta_0) = -0.05$. Указанное значение достаточно хорошо совпадает с данными [2] для вещественной части акустической проводимости диафрагмы с малой проницаемостью $\varepsilon \approx 0.07$. В сечении $x = L$ на входе в сверхзвуковое сопло с короткой дозвуковой частью вещественная часть акустической проводимости вычислялась по зависимости $\text{Re}(\eta_L) = M(k - 1)/2$ [2].

Пример влияния мнимых частей акустических проводимостей в граничных сечениях на частоту f свободных затухающих колебаний газа первой продольной акустической моды в КС ОП представлен на рис. 2. Расчеты проведены при фиксированных значениях теплофизических и газодинамических параметров потока, полученных с помощью программы TERRA

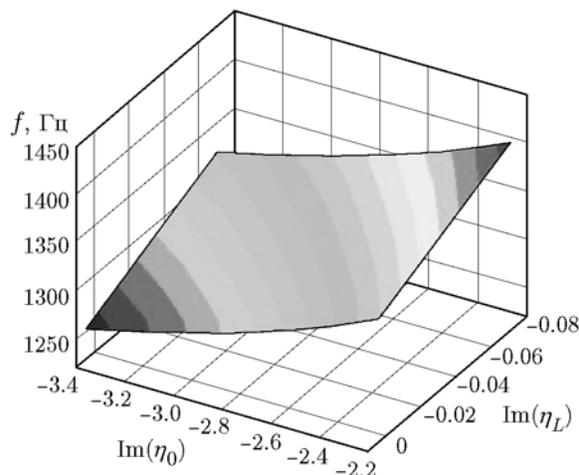


Рис. 2. Расчетные зависимости частоты свободных затухающих колебаний от мнимой части акустической проводимости во входном и выходном сечениях камеры сгорания ОП

[9] для термодинамически равновесного состава (скорость звука $c = 1\,268$ м/с, температура $T = 1\,650$ К, показатель адиабаты $k = 1.29$, число Маха $M = 0.05$). Расстояние между граничными сечениями задано $L = 0.3$ м. Показано, что акустическая проводимость в граничных сечениях КС ОП влияет на частоту f , которая в рассматриваемом диапазоне изменяется на $\approx 15\%$.

Отражение акустической волны на границе $x = L$ в зависимости от частоты колебаний, геометрической формы сопла ОП и параметров течения может происходить со смещением на величину ΔL относительно плоскости выходного сечения. При расчетах частоты продольной акустической моды колебаний длина ΔL является варьируемым параметром, $(L + \Delta L)/L = 0.9 \div 1.1$. Кроме того, при работе ОП может наблюдаться некоторое отклонение температуры рабочего тела от расчетной, что связано с нестационарным прогревом конструкции при иницировании рабочего процесса и на начальном этапе работы, а также с изменением эффективности рабочего процесса в различных режимах испытаний. В свою очередь, отклонение температуры и состава рабочего тела от расчетных обычно приводит к уменьшению скорости звука в КС ОП относительно данных [9], полученных для термодинамически равновесного состава без тепловых потерь. Характерное влияние первой продольной акустической моды колебаний длины

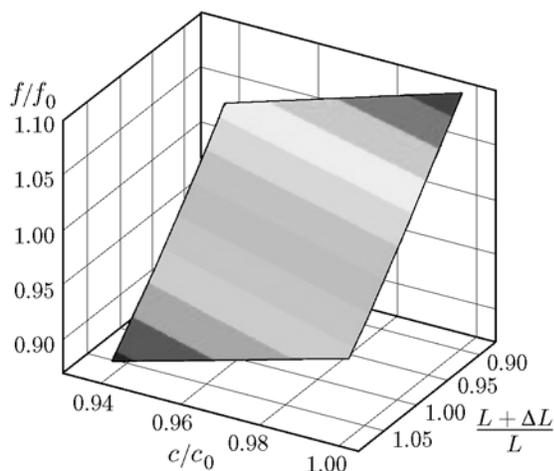


Рис. 3. Расчетные зависимости относительной частоты свободных затухающих колебаний от относительной длины камеры сгорания малогабаритного ОП и относительной скорости звука рабочего тела

$(L + \Delta L)/L$ камеры ОП и относительной скорости звука c/c_0 продуктов сгорания на относительную частоту f/f_0 иллюстрирует рис. 3. Здесь c_0 — расчетное значение скорости звука в продуктах сгорания при заданном соотношении компонентов рабочего тела и отсутствии тепловых потерь, f_0 — частота, рассчитанная при скорости звука c_0 и длине КС ОП L . Данные приведены для акустических проводимостей $\eta_0 = -0.05 + i \cdot 0.005$ и $\eta_L = 7.25 \cdot 10^{-3} - i \cdot 2.3$. В рассматриваемых диапазонах c/c_0 и $(L + \Delta L)/L$ расчетное значение частоты может изменяться до 8 % относительно f_0 .

Из представленных результатов расчета следует, что при известных акустических проводимостях на границах и параметре $L + \Delta L$ частота f свободных затухающих колебаний газа в КС ОП существенно зависит от скорости звука. Учитывая, что скорость звука связана с температурой и другими теплофизическими параметрами рабочего тела, измерение частоты при испытаниях ОП может быть одним из индикаторов эффективности организации рабочего процесса в КС.

Анализ данных показывает, что частота свободных затухающих колебаний газа в КС ОП может быть оценена из расчета по волновому уравнению с ненулевыми значениями акустических проводимостей в граничных сечениях. Уточнение значения частоты, а также определение амплитуды колебаний газа проводится

на этапе экспериментального исследования КС ОП.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

К числу основных зарегистрированных во время испытаний параметров, по которым можно судить об амплитуде и частоте пульсаций давления в КС ОП, относятся временные реализации и спектры нестационарных сигналов давления. Анализ экспериментальных данных позволит разработать мероприятия по снижению амплитуды пульсаций давления и обеспечению устойчивости рабочего процесса.

Измерения и обработка в режиме реального времени быстропеременных сигналов пульсаций давления при отработке режимов работы ОП необходимы также для разработки процедуры аварийной остановки при возникновении неустойчивого горения с целью обеспечения надежности и работоспособности всех стендовых систем при испытаниях КС ПВРД по схеме присоединенного воздухопровода.

В качестве экспериментального объекта в данной работе использовался малогабаритный ОП стенда Ц16ТБК НИЦ ЦИАМ, схема которого показана на рис. 1. Диаметр КС 120 мм, длина ≈ 300 мм. Массовый расход воздуха, кислорода и водорода $300 \div 700$, $80 \div 120$, $7 \div 15$ г/с соответственно. Реализуемый суммарный коэффициент избытка окислителя в КС составлял $\alpha_{\Sigma} = 2.7 \div 3.2$. Давление в КС достигало $12 \div 20$ бар, температура — 1650 К. Малые габариты и охлаждение водой всех теплонапряженных элементов КС обусловили повышенные тепловые потери (≈ 20 %) в КС. Запуск малогабаритного ОП проводился в автоматическом режиме по заранее подготовленной циклограмме. Длительность запуска составляла ≈ 30 с, из которых ≈ 15 с ОП работал в стационарном режиме с постоянным расходом компонентов. Полноту сгорания компонентов контролировали по измерениям давления в КС, которые сравнивали с расчетным значением, соответствующим условию термодинамического равновесия.

Для измерения пульсаций давления в камере ОП использовались высокочастотные пьезоэлектрические датчики с рабочим диапазоном частот до 200 кГц. Сигнал с датчика поступает на вход регистратора-анализатора, который в реальном времени проводит измерения

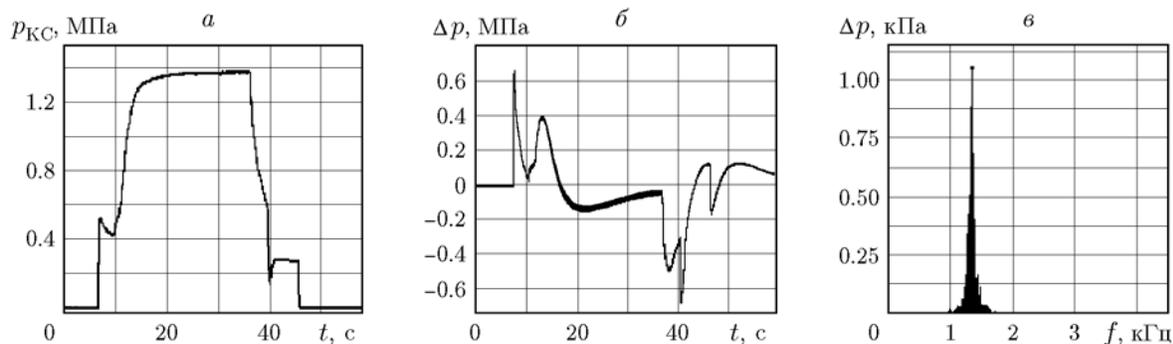


Рис. 4. Осциллограммы статического давления (а), реализации (б) и спектральной характеристики (в) пульсаций давления в камере сгорания малогабаритного ОП

и экспресс-анализ пульсаций давления. Датчики размещались на специально разработанных конструкциях волноводов [10], применяемых для измерения пульсаций в высокотемпературных потоках. Волновод состоит из приемного зонда с камерой, содержащей датчик, и демпфирующего длинного канала для исключения появления отраженных волн от его заглушенного конца. Сигналы пульсаций давления регистрировались при частоте опроса ≈ 13.5 кГц, что позволяло проводить частотный анализ в диапазоне $0 \div 6.75$ кГц. После испытаний окончательная обработка всех зарегистрированных экспериментальных сигналов осуществлялась пакетом WinПОС Expert, разработанным компанией «Мера».

На рис. 4 представлен пример временной реализации сигналов статического ($p_{КС}$) и динамического (Δp) давления, а также спектральная характеристика пульсаций давления в режиме с номинальным значением давления в КС ОП $p_{КС} = 1.5$ МПа и температурой рабочего тела $T_0 = 1700$ К. Выход ОП на рабочий режим характеризуется резким возрастанием давления в камере ОП, после чего давление остается практически неизменным до конца испытания, что определяется постоянством расхода компонентов рабочего тела.

Необходимо сделать некоторые пояснения относительно особенностей измерения пульсаций давления. Как отмечалось выше, измерения проводились пьезоэлектрическими датчиками, принцип действия которых основан на создании электрического заряда на поверхности кристалла. Величина электрического заряда пропорциональна изменению приложенного механического давления. Поэтому такие датчики не способны регистрировать статиче-

ские процессы, однако могут регистрировать изменение давления в быстропротекающих переходных и пульсирующих высокочастотных процессах. В режиме практически постоянного статического давления через характерный интервал времени показания датчиков уменьшаются, приближаясь к нулевому значению.

Следует отметить, что амплитуда пульсаций давления определяется с учетом коэффициента затухания волновода. При обработке экспериментов учтено, что коэффициент затухания является переменным параметром и зависит от частоты пульсаций f , а также от статического давления и температуры в КС ОП.

Эксперименты показали, что амплитуды спектральных составляющих Δp колебаний газа в КС ОП в каждый момент времени имеют разные значения. Исследование этого процесса можно провести на основе анализа спектрограммы (рис. 5), которая характеризует амплитуду и частоту пульсаций в виде функции от времени и позволяет проследить их трансформацию в каждый момент времени работы ОП.

Спектральный анализ сигналов пульсаций давления во временных интервалах, соответствующих практически постоянному давлению в КС, показал, что спектры сигналов пульсаций давления содержат ярко выраженную дискретную составляющую, частота которой для испытываемой геометрической конфигурации ОП изменяется в диапазоне $f = 1328 \div 1348$ Гц. Эти частоты, как обсуждалось выше, соответствуют первой собственной моде продольных акустических колебаний в объеме КС ОП [1, 2].

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что используемая мате-

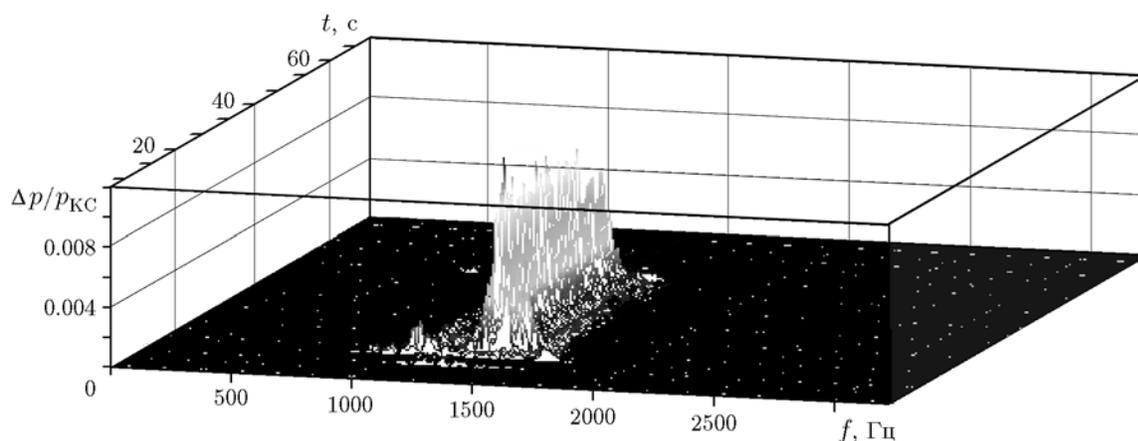


Рис. 5. Спектрограмма пульсаций давления в камере сгорания малогабаритного ОП

матическая модель позволяет проводить оценки частоты первой собственной акустической моды затухающих колебаний газа в КС ОП с погрешностью не более 7 %.

Одними из основных параметров пульсаций давления в ОП, по которым выполняется оценка их влияния на устойчивость горения, являются относительная амплитуда дискретных составляющих Δp и относительная суммарная амплитуда пульсаций давления Δp_{Σ} .

Для исследованных режимов работы ОП относительная амплитуда максимальной дискретной составляющей пульсаций давления $\Delta p/p_{KC}$ меньше 1 %. При этом относительная суммарная амплитуда пульсаций давления соответственно равна $\Delta p_{\Sigma}/p_{KC} < 4$ %. Следует отметить, что колебания с относительными амплитудами менее 5 ÷ 7 % не оказывают влияния на устойчивость горения в ОП.

Установлено, что с изменением давления в КС ОП происходит трансформация спектральной характеристики пульсаций давления (рис. 6). При росте давления относительная амплитуда пульсаций давления $\Delta p_{\Sigma}/p_{KC}$ увеличивается. В качестве причин этого можно предположить увеличение тепловыделения при горении в КС ОП, сопровождающееся повышением уровня турбулентных пульсаций и колебаний фронта пламени в турбулентном потоке, которые приводят к интенсификации акустических явлений. Таким образом, при высоком давлении в КС малогабаритных ОП могут потребоваться мероприятия, снижающие суммарный уровень пульсаций давления.

Кроме этого, при повышении давления в КС отмечается некоторое увеличение частоты

пульсаций и, как следствие, характеристической скорости пульсационного процесса, определяемой произведением fL . Зарегистрированное изменение частоты находится в пределах 5 % относительно режима с минимальным давлением $p_{KC} = 0.9$ МПа. Это является следствием изменения акустической проводимости на границах КС ОП и теплофизических параметров рабочего тела.

ВЫВОДЫ

В результате комплексного расчетно-экспериментального исследования установлено, что после инициирования рабочего процесса в ОП возбуждаются явно выраженные дискрет-

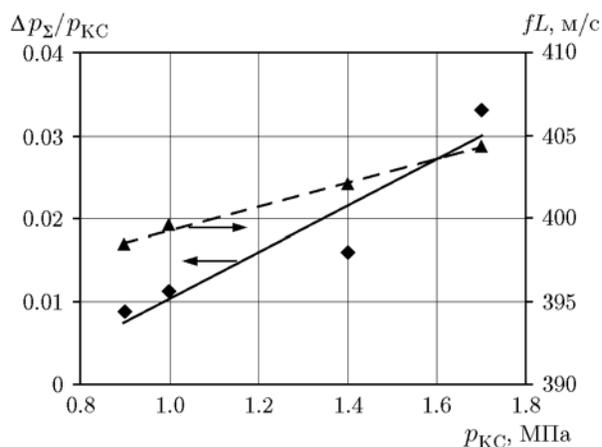


Рис. 6. Зависимость параметров спектральной характеристики пульсаций давления от давления в камере сгорания ОП

ные составляющие первой моды продольных колебаний газа с частотой $f = 1\,328 \div 1\,348$ Гц при длине КС $L = 0.3$ м.

В расчетах значение частоты f наиболее сильно зависит от места отражения акустической волны на границе вблизи выходного сечения, скорости звука в рабочем теле, а также от вещественной и мнимой частей акустической проводимости в граничных сечениях КС ОП. Показано, что использование представленной математической модели позволяет оценивать частоту первой собственной акустической моды затухающих колебаний газа в КС с погрешностью не более 7 % относительно экспериментальных данных.

В исследованных режимах работы ОП относительная амплитуда максимальной дискретной составляющей пульсаций давления составляла $\Delta p/p_{КС} < 1$ %. При этом суммарная относительная амплитуда пульсаций давления равнялась $\Delta p_{\Sigma}/p_{КС} < 4$ %, что не оказывает существенного влияния на устойчивость рабочего процесса. Установлено, что двукратное увеличение $p_{КС}$ приводит к увеличению $\Delta p_{\Sigma}/p_{КС}$ в $2.5 \div 3$ раза. При этом частота пульсаций увеличивается на $3 \div 4$ %. Таким образом, при высоком давлении в КС малогабаритных ОП могут потребоваться мероприятия по снижению суммарного уровня пульсаций давления.

Полученные расчетные и экспериментальные данные могут быть использованы при подготовке и настройке стендовых систем с огневыми подогревателями воздуха для испытания КС ПВРД перспективных летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Наганзон М. С.** Неустойчивость горения. — М.: Машиностроение, 1986.
2. **Ильченко М. А., Крютченко В. В., Мнацаканян Ю. С., Пинкэ И. М., Рудаков А. С., Руденко А. Н., Фоломеев Е. А., Эпштейн В. Л.** Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1995.
3. **Вибрации** в технике: справочник. Т. 1: Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. — М.: Машиностроение, 1978.
4. **Бендат Дж., Пирсол А.** Применение корреляционного и спектрального анализа. — М.: Мир, 1983.
5. **Антонов А. Н., Купцов В. М., Комаров В. В.** Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. — М.: Машиностроение, 1990.
6. **Кузнецов В. Р., Сабельников В. А.** Турбулентность и горение. — М.: Наука, 1986.
7. **Баев В. К., Серов Ю. В., Третьяков П. К.** О частоте колебаний фронта пламени в турбулентном потоке // Физика горения и взрыва. — 1970. — Т. 6, № 2. — С. 246–248.
8. **Кузнецов И. Л., Баранова Г. Р., Игнатенко Ю. В., Трохан А. М.** Влияние горения на уровень турбулентности // Физика горения и взрыва. — 1966. — Т. 2, № 3. — С. 129–132.
9. **Трусов Б. Г.** Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия», 24–26 августа 2005, Алмата, Казахстан. — 2005. — С. 52–57.
10. **Методы** измерения и обработки параметров физических процессов при испытаниях авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие / под ред. В. А. Скибина. — М.: ФГУП ЦИАМ им. П. И. Баранова, МАТИ — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2007.

*Поступила в редакцию 30/VI 2015 г.,
в окончательном варианте — 19/X 2015 г.*