

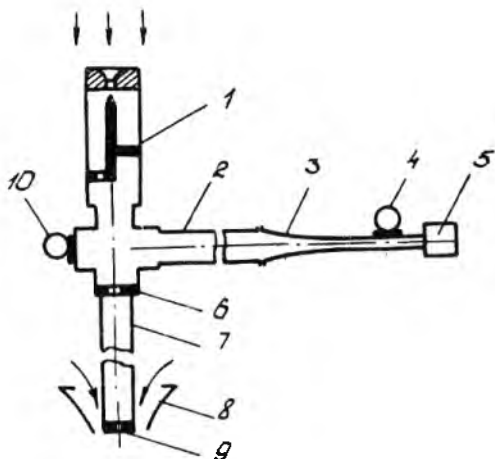
А.Г.Тимадиев, А.Ю.Козлов, В.А.Ипал

КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВОЛНОВОДНОЙ ЦЕПИ СТРУЙНО-АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Для волноводной цепи струйно-акустического датчика температуры предложено корректирующее устройство (КУ), состоящее из последовательно соединенных акустического усилителя и поглотителя колебаний, на стыке которых установлен датчик пульсаций давления. Изложена методика выбора параметров КУ и приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих повышение стабильности характеристики датчика температуры газа авиационного ГТД.

Одним из перспективных датчиков температуры, отличающихся высокой точностью и малой инерционностью, является струйно-акустический датчик, в котором частота выходного сигнала пропорциональна температуре газа. Для регистрации частоты колебаний давления на выходе из струйно-акустического преобразователя применяется датчик пульсаций давления, подсоединяемый при помощи волноводного канала. При этом важным является исключение влияния волноводной цепи на характеристику датчика температуры и предварительное усиление слабых акустических сигналов. Первая из указанных задач обусловлена зависимостью характеристики преобразователя температуры от противодавления [1] и непостоянством модуля входного импеданса волноводной цепи по частоте колебаний, а вторая — связана с существенным ослаблением колебаний давления в волноводе, особенно при низких средних давлениях, и отсутствием серийно выпускаемых микрофонных датчиков пульсаций давления, пригодных к работе в высокотемпературных условиях.

Предлагается повысить стабильность работы и точность струйно-акустического датчика температуры путем предварительного акустического усиления сигнала и реализации в волноводном канале режима бегущих волн. В качестве акустического усилителя используется пу-



Р и с. 1. Расчетная схема акустической цепи струйно-акустического датчика температуры: 1 - струйно-акустический датчик; 2 - волноводный канал; 3 - акустический усилитель; 4 - датчик пульсаций давления; 5 - корректирующий элемент; 6 - входной дроссель газоводного канала; 7 - газоводный канал; 8 - эжектор; 9 - выходной дроссель газоводного канала; 10 - охлаждаемый контрольный датчик пульсаций давления

порообразный насадок, площадь поперечного сечения которого изменяется по экспоненциальному закону (рис. 1). Режим бегущих волн в волноводе создается корректирующим элементом в виде пучка капиллярных каналов с суммарной площадью поперечного сечения, равной площади узкого конца акустического усилителя.

При расчете частотной характеристики волноводной цепи предполагается, что неоднородные участки можно представить в виде последовательного соединения однородных элементов с соответствующими площадями поперечного сечения и температурами газа. Потери колебательной энергии на стыке участков канала и теплообмен с окружающей средой не учитываются, потери энергии колебаний по длине волноводной цепи рассчитываются в соответствии с высокочастотной теорией [2]. С учетом принятых допущений акустический усилитель представляется в виде последовательного соединения однородных элементов с длинами

$$\ell_i = \frac{1}{\alpha_S} \ell_n \frac{S_i + \Delta S}{S_i},$$

где $\alpha_S = (1/\ell_n) \ell_n (S_{HD}/S_{HM})$, S_{HD} , S_{HM} - наибольшая и наименьшая площади поперечного сечения рупорообразного насадка. При этом площади двух последовательных элементов отличаются на величину $\Delta S = (S_{HD} - S_{HM})/n$, где n - число разбиений акустического усилителя по длине. Комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на входе в i -й элемент волноводной цепи и выходе из него связаны зависимостями, представленными в нормированных параметрах [3]:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{i1} &= \bar{p}_{i2} \operatorname{ch} \bar{\Gamma}_i \bar{\ell}_i + \bar{z}_{B_i} \bar{q}_{i2} \operatorname{sh} \bar{\Gamma}_i \bar{\ell}_i; \\ \bar{q}_{i1} &= \frac{1}{\bar{z}_{B_i}} \bar{p}_{i2} \operatorname{sh} \bar{\Gamma}_i \bar{\ell}_i + \bar{q}_{i2} \operatorname{ch} \bar{\Gamma}_i \bar{\ell}_i, \quad i=1, 2, \dots, I, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\bar{z}_{B_i} = \frac{1}{d_i^2 \sqrt{\bar{\Gamma}_i}} \left[1 - j \frac{64 D n_i}{\pi \bar{\omega}} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$$\bar{\Gamma}_i = j \frac{\pi \bar{\omega}}{2 \sqrt{\bar{\Gamma}_i}} \left[1 - j \frac{64 D n_i}{\pi \bar{\omega}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

при $\bar{\omega} < \frac{256 D n_i}{\pi d_i^2}$ и

$$\bar{z}_{B_i} = \frac{1}{d_i^2 \sqrt{\bar{\Gamma}_i}} \left[4 \sqrt{\frac{D n_i}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4(\kappa-1)}{\sqrt{\rho_r}} \sqrt{\frac{D n_i}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{-\frac{1}{2}}; \quad (3)$$

$$\bar{\Gamma}_i = \frac{\pi \bar{\omega}}{2 \sqrt{\bar{\Gamma}_i}} \left[4 \sqrt{\frac{D n_i}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4(\kappa-1)}{\sqrt{\rho_r}} \sqrt{\frac{D n_i}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}}$$

при $\bar{\omega} > \frac{256 D n_i}{\pi d_i^2}$;

$\bar{p}_i = p_i / \rho_I c_i^2$, $\bar{q}_i = q_i / c_i S$ - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода; индекс I указывает на принадлежность параметра к входному сечению, а 2 - к выходному сечению i -го элемента; $\bar{d}_i = d_i / d$; $\bar{\ell}_i = \ell_i / \ell$;

$$D_{n2} = \frac{D_n \bar{T}_i (37,6/T_i + 0,506 \bar{T}_i)}{d_i^2 (37,6/T_i + 0,506)}; \quad D_n = \frac{\nu l}{cd^2}$$

- коэффициент диссипации волн в волноводном канале; l, l_i - общая длина волновода с акустическим усилителем и i -го элемента цепи; d, d_i - диаметры волновода и i -го элемента цепи;

$\bar{\omega} = \omega / \omega_0$; $\bar{\omega}_0 = \pi c_T / 4l$ - угловая частота собственных колебаний закрытого со свободного конца волноводного канала длиной l ; ω - угловая частота вынужденных колебаний; ρ_T, T_T, ν_T - плотность, температура и кинематическая вязкость газа; c_T - скорость звука в газе в конце усилителя (в I-м сечении); S - площадь поперечного сечения подводящего канала.

При выводе соотношения для D_{n2} использовалась зависимость динамической вязкости воздуха от температуры [4] в виде

$$\rho_T \nu_T = (37,6 + 0,506 T_T) 10^7.$$

Для других газов расчетные выражения для D_{n2} будут иные, в соответствии с зависимостью их вязкости от температуры.

Комплексные амплитуды колебаний давления и расхода в граничных сечениях элементов цепи определяются равенствами

$$\bar{P}_{(i-1)2} = \bar{P}_{i1}, \quad \bar{Q}_{(i-1)2} = \bar{Q}_{i1} \quad (4)$$

для сечений в последовательной цепи,

$$\bar{P}_{i2} = \bar{P}_g = \bar{P}_{k1}; \quad \bar{Q}_{i2} = \bar{Q}_g + \bar{Q}_{k1} N_k \quad (5)$$

для узла соединения акустического усилителя, датчика пульсаций давления и капиллярного корректирующего элемента. В формулах (5) приняты обозначения: \bar{P}_g, \bar{P}_{k1} - комплексные амплитуды колебаний давления на входе в полость датчика пульсаций давления и на входе в пучок капиллярных каналов; \bar{Q}_g, \bar{Q}_{k1} - комплексные амплитуды колебаний расхода на входе в датчик давления и на входе в капилляры; N_k - число капилляров. Величины \bar{P}_g и \bar{Q}_g связаны известной формулой [3]

$$\bar{Q}_g = \bar{Y}_g \bar{P}_g, \quad (6)$$

где $\bar{Y}_g = j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \bar{V}_g$ - входная акустическая проводимость рабочей полости датчика давления; $\bar{V}_g = V/\ell S$; V - приведенный объем полости датчика. Если учесть, что капиллярные каналы со свободного конца закрыты, то входная акустическая проводимость пучка капилляров определяется выражением

$$\bar{Y}_K = N_K \frac{\bar{d}_K}{\bar{Z}_{BK}} \operatorname{th} \bar{\Gamma}_K \bar{\ell}_K, \quad (7)$$

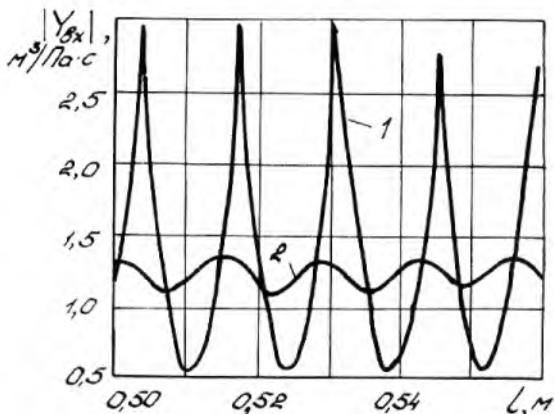
где $\bar{d}_K = d_K/d$; $\bar{\ell}_K = \ell_K/\ell$; d_K, ℓ_K - диаметр и длина капилляров; $\bar{Z}_{BK}, \bar{\Gamma}_K$ - относительные волновое сопротивление и коэффициент распространения волн, определяемые по формулам (2) и (3) с тем отличием, что вместо \bar{d}_i используется \bar{d}_K и $\bar{\Gamma}_i = 1$. Тогда комплексные амплитуды колебаний давления и расхода на входе в пучок капилляров можно выразить соотношением

$$\bar{q}_K = \bar{Y}_K \bar{P}_K. \quad (8)$$

При расчете частотной характеристики волноводной цепи по уравнениям (1)-(8) применяется импедансный метод [5], заключающийся в том, что вначале при движении от конца цепи к ее началу определяются входные акустические проводимости (импедансы) участков и цепи в целом, находятся комплексные амплитуды давления и расхода в начальном сечении, затем, при движении в обратном направлении, рассчитываются комплексные амплитуды давления и объемного расхода во всех выделенных сечениях, в том числе и в рабочей полости датчика пульсаций давления \bar{P}_g . При известном давлении на входе $\bar{P}_{BK} = \bar{P}_1$ и рассчитанном \bar{P}_g определяется частотная функция волноводной цепи

$$W(j\bar{\omega}) = \bar{P}_g / \bar{P}_{BK}. \quad (9)$$

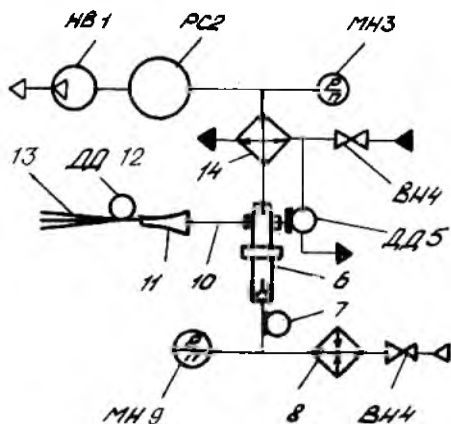
Для расчета частотной функции цепи и входной акустической его проводимости $Y_{BK}(j\omega) = \bar{P}_{BK} / \bar{q}_{BK}$ разработан пакет прикладных программ на алгоритмическом языке Фортран-4. Расчеты на мини-ЭВМ в диалоговом режиме позволили провести анализ частотных характеристик волноводной цепи и выбрать параметры акустического усилителя и капиллярного корректирующего элемента.



Р и с. 2. Зависимость модуля входной проводимости волноводной цепи струйно-акустического датчика температуры от удлинения волновода ($a = 8$ мм; $T = 300$ К; $P_{ар} = 1,01 \cdot 10^5$ Па; $V_d = 50$ мм³) без корректирующего элемента (1) и с капиллярным корректирующим элементом (2) ($d_k = 0,8$ мм; $l_k = 0,25$ м; $N_k = 100$ шт)

Для анализа влияния входной проводимости волновода на точность струйно-акустического датчика в докритических режимах его работы рассмотрим график модуля входной проводимости конкретной цепи, построенной в зависимости от удлинения волновода при постоянной частоте колебаний (рис. 2). Из рис. 2 следует, что при изменении длины волновода модуль входной проводимости цепи изменяется по волнообразной кривой, причем при минимальном значении $|Y_{вх}(f, \omega)|$ на струйно-акустическом датчике реализуются повышенный динамический перепад давления и более высокая частота автоколебаний и наоборот. Уменьшить разброс модуля входного импеданса цепи можно, подсоединив к концу цепи капиллярный корректирующий элемент (кривая 2 на рис. 2).

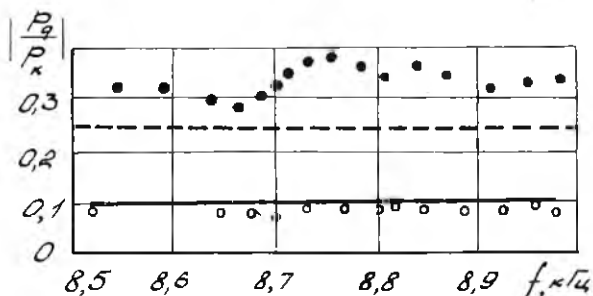
В рупорообразном насадке, в идеальном случае, достигается коэффициент усиления d/dx при длине усилителя больше длины волны передаваемых колебаний давления. В реальных условиях из-за несогласованности акустической нагрузки в конце усилителя и влияния трения по длине волновода могут быть отличия в



Р и с. 3. Пневмогидравлическая схема установки для испытаний струйно-акустического датчика температуры: НВ1 - насос вакуумный (АВЗ-90); РС2 - резонатор; МН3, МН9 - мановакууметр (-I; +I) · 10⁵ Па; ВН4 - дроссельный кран; ДД5 - охлаждаемый датчик пульсаций давления ДД6-002Т; 6 - струйно-акустический датчик температуры; 7 - термопара (ХК); 8 - нагревательный элемент; 10 - волноводный канал; II - акустический усилитель; 12 - датчик давления ДД6-002Т; 13 - капиллярный корректирующий элемент; 14 - воздушно-водяной теплообменник

коэффициенте усиления насадка. Амплитудно-частотная характеристика цепи с усилителем такова, что начиная с определенной частоты колебаний происходит вначале усиление акустических колебаний, а затем медленный спад из-за повышения потерь энергии колебаний по мере увеличения частоты.

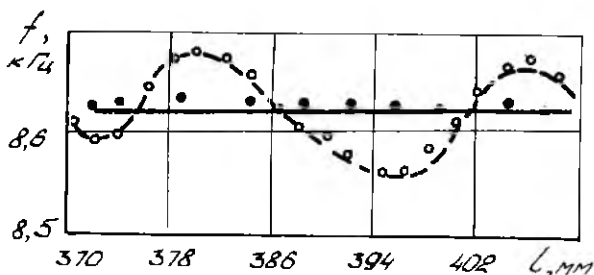
Экспериментальные исследования (рис. 3) струйно-акустического датчика температуры, разработанного Омским машиностроительным КБ, качественно подтвердили теоретические амплитудно-частотные характеристики (рис. 4), определенные для разреженной рабочей среды, соответствующей высотным условиям. В качестве рабочего и контрольного охлаждаемого датчиков пульсаций давления применялся датчик ДД6-002Т производства ЛИИ с соответствующей аппаратурой. В эксперименте температура на входе в датчик изменялась в диапа-



Р и с. 4. Амплитудно-частотная характеристика волноводной цепи струйно-акустического датчика температуры при $P_{\text{ср}} = 0,2 \cdot 10^5$ Па (абс.), $\ell = 1,4$ м, $d = 8$ мм: — — — расчет, \circ — эксперимент без акустического усилителя с капиллярным корректирующим элементом ($N_k = 100$ шт, $\ell_k = 0,53$ м; $d_k = 0,8$ м); - - - расчет; \bullet — эксперимент с акустическим усилителем ($\ell_y = 80$ мм, $d_{\text{млн}} = 3$ мм, $d_{\text{max}} = 8$ мм) и капиллярным корректирующим элементом ($N_k = 34$ шт, $\ell_k = 0,4$ м, $d_k = 0,5$ м)

зоне (300...850)К, что приводило к изменению частоты автоколебаний в пределах (7...15) кГц.

Для плавного изменения длины волновода была изготовлена телескопическая вставка (с диаметром гильз 8 и 7,9 мм), которая устанавливалась на выходе из волновода (перед датчиком давления). Из графика на рис. 4 следует, что применение в волноводе акустической неотражающей нагрузки в виде пучка капиллярных каналов позволяет стабилизировать характеристики струйно-акустического преобразователя температуры, а предварительное усиление акустического сигнала дает возможность применять датчики пульсаций давления с меньшей чувствительностью.



Р и с. 5. Зависимость частоты колебаний давления газа на выходе из струйно-акустического датчика температуры при изменении длины волноводного канала с усилителем: \circ - эксперимент, — — — аппроксимация без корректирующего элемента; \bullet - эксперимент, — — — — — аппроксимация с капиллярным корректирующим элементом ($N_k = 34$ шт, $l_k = 0,4$ м, $d_k = 0,5$ мм)

Библиографический список

1. Власов И.И. Определение частоты автоколебаний в струйно-акустическом генераторе //Изв. вузов. Авиационная техника. 1977. № 1. С. 31-36.
2. Карам мл., Франк. Частотные характеристики пневматических линий передач //Труды *ASME* Теоретические основы инженерных расчетов. 1967. № 2. С. 149-155.
3. Быстров Н.Д., Гимадиев А.Г., Шорин В.П. Об одной схеме выравнивания амплитудно-частотных характеристик акустических каналов систем измерения давления //Изв. вузов. Авиационная техника. 1981. № 3. С. 22-26.
4. Ибрагимов И.А., Фарзана Н.Г., Илясов Л.В. Элементы и системы пневмоавтоматики. М.: Высшая школа, 1975. 360 с.
5. Шорин В.П., Гимадиев А.Г., Берестнев Г.И. Исследование статических характеристик демпфированных гидравлических цепей систем контроля и управления при колебаниях давления на входе //Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988. С. 59-69.