

Н. Д. Быстров, А. Г. Гимадиев

РАЗРАБОТКА ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для измерения и контроля пульсаций давления в различных точках ГТД в условиях ограниченной доступности к точке измерения, повышенных температур и вибраций применяют акустические зонды, включающие волноводный канал, корректирующее устройство (КУ) и датчик давления [1], [2], [3]. Однако загрязненность газов по воздушно-газовому тракту двигателя приводит к быстрому засорению входного канала датчиков или КУ, расположенного на входе в волновод, что приводит к снижению надежности зонда и необходимости частой его замены. Менее подвержены засорению зонды с демпфером (дросселирующим элементом) на входе в датчик [4], но при этом ограничивается диапазон частот измерения. Поэтому предлагается и исследуется зонд с простым КУ, установленным в конце волновода за демпфером (параллельно датчику давления), при котором обеспечивается измерение пульсаций давления в широком диапазоне частот.

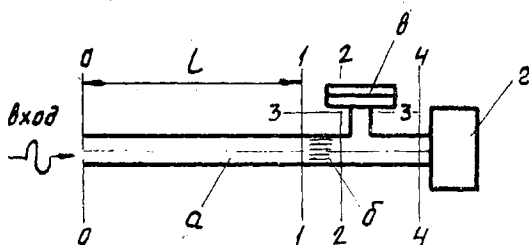


Рис. 1. Расчетная схема зонда с корректирующим устройством: а — подводящий волноводный канал; б — дроссель; в — датчик пульсаций давления; г — корректирующее устройство

При расчетах предполагается, что источник колебаний давления расположен на входе в измерительный канал, потери на трение по длине волновода малы, акустическое сопротивление дросселя на входе в датчик является линейным, активным и не зависит от частоты колебаний. Для рассматриваемой акустической цепи (рис. 1) комплексные амплитуды колеба-

ний давления и объемного расхода в различных сечениях связаны соотношениями [5]:

для волновода

$$p_0 = p_1 \cos \frac{\omega l}{c} + j Z_{\text{в}} q_1 \sin \frac{\omega l}{c}, \quad (1)$$

для дросселирующего элемента

$$\begin{cases} p_1 = p_2 + R q_1; \\ q_1 = q_2, \end{cases} \quad (2)$$

для датчика давления и КУ

$$\begin{cases} q_2 = q_3 + q_4, & q_3 = Y_{\text{д}} p_3; \\ q_4 = Y_{\text{к}} p_4, & p_2 = p_3 = p_4, \end{cases} \quad (3)$$

где p_i , q_i — комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода в соответствующих сечениях ($i=0, 1, \dots, 4$); $Z_{\text{в}}$ — волновое сопротивление волновода; l — длина волновода; ω — круговая частота; c — скорость звука в волноводе; R — акустическое сопротивление дросселирующего элемента; $Y_{\text{д}}$, $Y_{\text{к}}$ — акустические проводимости датчика и КУ; $j = \sqrt{-1}$.

Предполагая, что акустическая проводимость датчика имеет емкостный характер, т. е. $Y_{\text{д}} = j \frac{V \omega}{\rho c^2}$ (V — приведенный объем газовой полости датчика; ρ — плотность рабочей среды), можно утверждать, что p_2 является параметром, непосредственно измеряемым датчиком. Проводимость КУ можно представить через действительную и мнимую части

$$Y_{\text{к}} = R e Y_{\text{к}} + j \text{Im } Y_{\text{к}}. \quad (4)$$

Тогда, решая совместно уравнения (1) — (4) относительно частотной функции $\frac{p_2}{p_0}$, получим:

$$\frac{p_2}{p_0} = [A + j B]^{-1}, \quad (5)$$

где $A = (1 + R \text{Re } Y_{\text{к}}) \cos \frac{\omega l}{c} - Z_{\text{в}} \left(\frac{V \omega}{\rho c^2} + \text{Im } Y_{\text{к}} \right) \sin \frac{\omega l}{c}$;

$$B = \left(R \frac{V \omega}{\rho c^2} + R \text{Im } Y_{\text{к}} \right) \cos \frac{\omega l}{c} + Z_{\text{в}} \text{Re } Y_{\text{к}} \sin \frac{\omega l}{c}. \quad (6)$$

Для обеспечения передачи колебаний давления по волноводу без амплитудных искажений и со сдвигом по фазе, соот-

ветствующим «транспортному» запаздыванию, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{mod} \frac{P_2}{P_0} &= 1; \\ \operatorname{arg} \frac{P_2}{P_0} &= -\frac{\omega l}{c} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

С учетом равенства (5) уравнения (7) можно преобразовать к виду

$$\left. \begin{aligned} A^2 + B^2 &= 1; \\ \frac{B}{A} &= \operatorname{tg} \frac{\omega l}{c}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решая уравнения (8) относительно A и B , получим:

$$A = \pm \cos \frac{\omega l}{c}; \quad B = \pm \sin \frac{\omega l}{c}.$$

Исследование этих решений показало, что лишь при положительных значениях A и B могут быть реализованы пассивные КУ. Подставляя эти положительные решения в уравнения (6), и решая их относительно $\operatorname{Re} Y_K$ и $\operatorname{Im} Y_K$, получим:

$$\operatorname{Re} Y_K = \frac{Z_B}{R^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\omega l}{c} + Z_B^2};$$

$$\operatorname{Im} Y_K = \frac{R \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c}}{R^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\omega l}{c} + Z_B^2} - \frac{V \omega}{\rho c^2}.$$

Из выражения для $\operatorname{Im} Y_K$ видно, что КУ должно иметь на входе параллельно включенную полость с отрицательной емкостью, но это практически не реализуется. Следовательно, наилучшим образом можно скорректировать частотную характеристику лишь для зонда с датчиком, имеющим $V=0$.

Имея в виду, что входной импеданс КУ $Z_K = \frac{1}{Y_K}$, определим с учетом $V=0$ действительную ($\operatorname{Re} Z_K$) и мнимую ($\operatorname{Im} Z_K$) части импеданса Z_K :

$$\operatorname{Re} Z_K = Z_B;$$

$$\operatorname{Im} Z_K = -R \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c}.$$

Тогда будем иметь:

$$Z_K = Z_B - j R \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c}. \quad (9)$$

Из анализа выражения (9) ясно, что импеданс КУ Z_k представляет собой входной импеданс заглушенного с одного конца трубопровода длиной l , на входе которого установлен сосредоточенный дроссель. Причем, волновое сопротивление трубопровода $Z_{вк}$ равно R , а сопротивление дросселя R_k равно $Z_{в}$. Полученный таким образом зонд представляет последовательное соединение волновода и трубопровода одинаковой длины, на стыке которых установлены датчик давления и дроссели. Сопротивление дросселя на выходе из волновода (перед датчиком) равно волновому сопротивлению трубопровода КУ, а сопротивление дросселя на входе в трубопровод КУ равно волновому сопротивлению волновода (рис. 2).

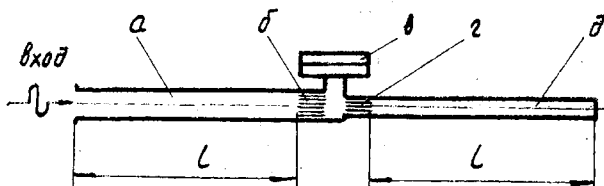


Рис. 2. Схема зонда с корректирующим устройством в виде заглушенного со свободного конца трубопровода и дросселя на входе: а — подводящий волноводный канал; б — дроссель датчика; в — датчик пульсаций давления; г — дроссель корректирующего устройства; д — трубопровод корректирующего устройства

Согласно формуле $Z_{вк} = \frac{\rho c}{S_k}$ (где S_k — площадь проходного сечения трубопровода КУ), большому сопротивлению $R = Z_{вк}$ соответствует малая площадь S_k и малые габариты КУ. Однако при очень малых диаметрах трубопровода КУ потери на трение по длине трубопровода могут оказать существенное влияние на динамическую точность зонда. Следует заметить, что любой датчик имеет определенную податливость мембраны чувствительного элемента. При этом $V \neq 0$, что также может привести к снижению динамической точности зонда. Поэтому для оценки влияния этих факторов на точность зонда исследованы частотные характеристики зонда с учетом потерь на трение по длине волновода и трубопровода КУ, а также приведенного объема полости датчика V .

С учетом потерь на трение и того, что $R_k = Z_{в}$ и $Z_{вк} = R$, уравнения (1) и (9) примут следующий вид [6]:

$$p_0 = p_1 \operatorname{ch} \Gamma l + Z_{в} q_1 \operatorname{sh} \Gamma l; \quad (10)$$

$$Z_K = R_K + Z_{BK} \operatorname{cth} \Gamma_K l, \quad (11)$$

где $\Gamma = \alpha + j\beta$; $\Gamma_K = \alpha_K + j\beta_K$ — коэффициенты распространения акустических волн по волноводу и трубопроводу КУ.

Решив совместно уравнения (2), (3), (10), (11) с учетом выражений для Y_d и $Y_K = \frac{1}{Z_K}$, получим:

$$\frac{P_2}{P_0} = \left[\operatorname{ch} \Gamma l + j \frac{V \omega}{P c^2} (Z_B \operatorname{sh} \Gamma l + R \operatorname{ch} \Gamma l) + \frac{\operatorname{sh} \Gamma_K (Z_B \operatorname{sh} \Gamma l + R \operatorname{ch} \Gamma l)}{R_K \operatorname{sh} \Gamma_K l + Z_{BK} \operatorname{ch} \Gamma_K l} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Вводя безразмерные параметры, преобразуем уравнение (12). При этом воспользуемся формулами для коэффициента распространения волн и коэффициента диссипации, приведенными в работах [6], [7], и выражениями $R = Z_{BK}$ и $R_K = Z_B$. Тогда будем иметь

$$\frac{P_2}{P_0} = \left[\operatorname{ch} \bar{\Gamma} + j \frac{\pi}{2} \bar{V} \bar{\omega} (\operatorname{sh} \bar{\Gamma} + \bar{Z}_{BK} \operatorname{ch} \bar{\Gamma}) + \frac{\operatorname{sh} \bar{\Gamma}_K (\operatorname{sh} \bar{\Gamma} + \bar{Z}_{BK} \operatorname{ch} \bar{\Gamma})}{\operatorname{sh} \bar{\Gamma}_K + \bar{Z}_{BK} \operatorname{ch} \bar{\Gamma}_K} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где $\bar{\Gamma} = \bar{\alpha} + j\bar{\beta}$, $\bar{\Gamma}_K = \bar{\alpha}_K + j\bar{\beta}_K$;

$$\bar{\alpha} = \left(\frac{\gamma - 1}{\sqrt{P_r}} + 1 \right) \sqrt{\pi \omega D_n}, \quad \bar{\beta} = \frac{\pi}{2} \bar{\omega};$$

$$\bar{\alpha}_K = \bar{\alpha} \sqrt{\bar{Z}_{BK}}; \quad \bar{\beta}_K = \bar{\beta};$$

γ — показатель адиабаты; P_r — число Прандтля; $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}$ — относительная частота колебаний; $\omega_0 = 2\pi f_0$ — первая круговая собственная частота акустических колебаний закрытого с одного конца волновода ($f_0 = \frac{c}{4l}$); $D_n = \frac{\nu l}{c d^2}$ — коэффициент диссипации волн в волноводе; ν — кинематическая вязкость газа; d — внутренний диаметр волновода; $\bar{Z}_{BK} = \frac{Z_{BK}}{Z_B}$ — относительное волновое сопротивление трубопровода КУ; $\bar{V} = \frac{V}{\frac{\pi d^2}{4} l}$ —

относительный объем газовой полости датчика.

Исследование характеристик зонда, проведенное по формуле (13) показало, что при $\bar{V} = 0$ и $Z_{BK} \ll 1$ ($d_K \gg d$) ампли-

тудно-частотная характеристика (АЧХ) зонда представляет практически монотонно нисходящую кривую, а при $Z_{\text{вк}} \ll 1$ ($d_k < d$) АЧХ зонда имеет колебательный характер, проявляющийся тем сильнее, чем выше рассеивающие свойства системы. При $Z_{\text{вк}} = 1$ ($d_k = d$) и различных значениях приведенного объема \bar{V} газовой полости датчика АЧХ зонда представляет плавную нисходящую кривую, темп снижения которой тем сильнее, чем больше \bar{V} . В качестве примера на рис. 3 приведе-

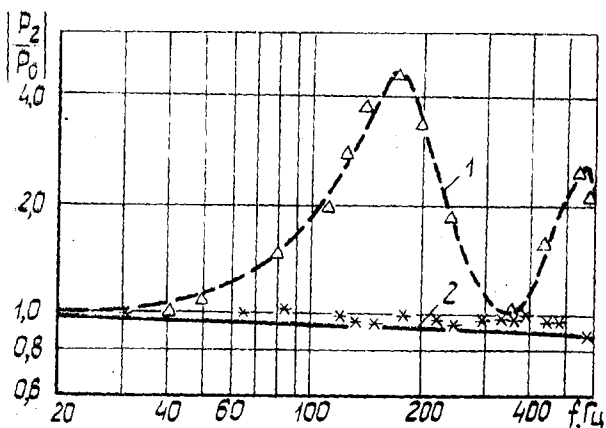


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика зонда: 1 — без корректирующего устройства: $l = 0,44$ м; $d = 3,95 \cdot 10^{-3}$ м; $D_n = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $P_{\text{ср}} = 1112$ гПа; температура 20°C ; — Δ — эксперимент; 2 — с корректирующим устройством: $l = 0,44$ м; $d_k = d = 3,95 \cdot 10^{-3}$ м; $Z_{\text{вк}} = 1$; $\bar{V} \approx 0$; дроссели из пористого материала МР с пористостью 0,8 и длиной 10^{-2} м; — расчет; * — эксперимент

на АЧХ зонда с корректирующим устройством и без него при $\bar{V} \approx 0$ и $Z_{\text{вк}} = 1$. Экспериментальные исследования зонда с датчиком пульсаций давления ДМИ-0,6 подтвердили расчетную зависимость с погрешностью $\pm 10\%$.

На основании полученных результатов можно сделать вывод: приведенную схему коррекции частотных характеристик зонда целесообразно применять при низких уровнях диссипации колебательной энергии (маловязкие жидкие среды, газ под высоким давлением) и при использовании датчиков пульсаций давления с малым приведенным объемом газовой полости.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 301619. Аэрометрический приемник/Каплун Я. П., Вашкевич М. П. — Оpubл. в Б. И., 1971, № 14.
2. А. с. 427252. Устройство для измерения пульсаций давления газа/Богданов В. В. — Оpubл. в Б. И., 1974, № 17.
3. А. с. 475524. Устройство для измерения нестационарных давлений в гидросистемах/Гимадиев А. Г., Брудков Л. И. — Оpubл. в Б. И., 1975, № 24.
4. Андрианкин О. А. Средства измерения пульсирующего давления потока в канале воздухозаборника самолета в стендовых условиях. — В сб.: Вопросы аэрогидромеханики летательных аппаратов. — МАИ, 1975, вып. 323.
5. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. — М.: МГУ, 1960.
6. Карам мл., Франк. Частотные характеристики пневматических линий передач. — Труды ASME, 1967, т. 89, сер. Д.
7. Гудсон, Леонард. Обзор методов моделирования переходных процессов в гидравлических линиях. — Труды ASME, 1972, т. 94, сер. Д, № 2.

УДК 534.11.001

В. В. Волков, А. Л. Клумбис, К. М. Рагульские

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ И ВИБРОДИАГНОСТИКА СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Проведение испытаний сложных машинных конструкций, состоящих из неподвижно соединенных элементов, на усталость, прочность и ресурс связано с непрерывной оценкой технического состояния конструкций и определением характера его изменения. Среди множества методов оценки технического состояния конструкций в последнее время широкое распространение получили методы вибродиагностики, основанные на измерении и анализе динамических характеристик [1]. Практическое применение методов вибродиагностики предполагает наличие информации о характере изменения динамических характеристик конструкции в зависимости от ее дефектного состояния. Получение такой информации для сложных механических систем требует обширных экспериментальных исследований, которые можно существенно сократить применением математического моделирования дефектных состояний объектов диагностирования.

В настоящей работе предлагается метод выявления и анализа диагностических признаков сложных механических конструкций, в основу которого положено математическое моде-