

В. П. ШОРИН

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ТИПА АКУСТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НИЗКИХ ЧАСТОТ

Расчеты и ряд экспериментальных данных показали, что для устранения колебаний рабочей среды в диапазоне частот свыше 150—200 гц в гидравлических системах летательных аппаратов с успехом могут быть применены гасители, построенные по принципу акустического фильтра низких частот.

Проектировочный расчет гасителя при заданном месте его расположения в трубопроводной системе включает выбор схемы, определение числа ячеек и расчет геометрических размеров, обеспечивающих заданные характеристики.

Ниже приводится методика проектировочного расчета гасителя типа акустического фильтра низких частот для случая, когда гаситель установлен непосредственно у источника колебаний и размеры гасителя меньше длины звуковой волны. Из возможных источников рассматриваются только источники переменного расхода ( $z_{ист} = \infty$ ) и источники переменного давления ( $z_{ист} = 0$ ), предполагается также, что элементы гасителя обладают высокой добротностью.

При наложенных условиях эффективность действия гасителя можно определить следующими зависимостями для коэффициента вносимого затухания [1]:

$$K_{вн} = \frac{1}{2} K_c \left| \sqrt{\frac{z_{c2}}{z_{c1}}} \right| \cdot \left| 1 + \frac{z_n}{z_{c2}} \right| \quad (1)$$

— для случая установки гасителя за источником переменного расхода;

$$K_{вн} = \frac{1}{2} K_c \left| \sqrt{\frac{z_{c1}}{z_{c2}}} \right| \cdot \left| 1 + \frac{z_{c2}}{z_n} \right| \quad (2)$$

— для случая установки гасителя за источником переменного давления. Для симметричных фильтров формулы (1), (2) примут вид:

$$K_{\text{вн}} = \frac{1}{2} K_c \left| 1 + \frac{z_{\text{н}}}{z_{c_2}} \right|, \quad (3)$$

$$K_{\text{вн}} = \frac{1}{2} K_c \left| 1 + \frac{z_{c_1}}{z_{\text{н}}} \right|. \quad (4)$$

В формулах (1) — (4)

$K_{\text{вн}}$  — коэффициент вносимого затухания;

$K_c$  — коэффициент собственного затухания,

$z_{c_1}$  — волновое сопротивление гасителя со стороны источника колебаний,

$z_{c_2}$  — волновое сопротивление гасителя со стороны присоединенной трубопроводной системы,

$z_{\text{н}}$  — входной импеданс присоединенной трубопроводной системы.

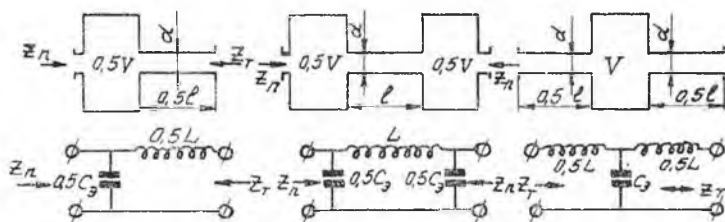


Рис. 1

Члены  $\frac{1}{2} \left| 1 + \frac{z_{c_2}}{z_{\text{н}}} \right|$ ;  $\frac{1}{2} \left| 1 + \frac{z_{\text{н}}}{z_{c_2}} \right|$  характеризуют затухание, обусловленное отражением в месте соединения гасителя с системой,

члены  $\left| \sqrt{\frac{z_{c_1}}{z_{c_2}}} \right|$ ;  $\left| \sqrt{\frac{z_{c_2}}{z_{c_1}}} \right|$  характеризуют затухание за счет несимметричности гасителя.

На рис. 1 приведены схемы типовых звеньев гасителей колебаний и их электрические аналоги для случая, когда размеры ячейки малы по сравнению с длиной звуковой волны и активными потерями в ячейке можно пренебречь.

Величина индуктивности в ячейке

$$L = \frac{\rho l}{S}, \quad (5)$$

величина емкости

$$C_3 = \frac{V}{\rho c^2}. \quad (6)$$

Здесь  $\rho$  — плотность рабочей среды;

$c$  — скорость звука;

$V$  — объем полости ячейки;

$l$  — длина соединительной трубки;

$S$  — площадь поперечного сечения соединительной трубки.

Основные характеристики ячеек, исходя из схем их электрических аналогов, можно записать в виде [2]

$$f_{гр} = \frac{1}{\pi \sqrt{LC_3}} = \frac{c}{\pi \sqrt{\frac{Vl}{S}}} \quad (7)$$

— граничная частота полосы гашения;

$$K_c = (\eta + \sqrt{\eta^2 - 1})^2 \quad (8)$$

— коэффициент собственного затухания  $T$  и  $\Pi$  звеньев;

$$K_c = \eta + \sqrt{\eta^2 - 1} \quad (8')$$

— коэффициент собственного затухания  $\Gamma$ -полузвена;

$$\eta = \frac{1}{\Gamma_{гр}} \quad (9)$$

— нормированная частота (так как рассматривается только полоса гашения  $\eta \geq 1$ );

$$z_T = jR \sqrt{\eta^2 - 1} \quad (10)$$

— волновое сопротивление  $T$ -образной ячейки;

$$z_{\Pi} = \frac{R}{j \sqrt{\eta^2 - 1}} \quad (11)$$

— волновое сопротивление  $\Pi$ -образной ячейки;

$$R = \rho c \sqrt{\frac{l}{SV}} \quad (12)$$

Волновое сопротивление  $\Gamma$ -образной ячейки со стороны емкости равно волновому сопротивлению  $\Pi$ -образной ячейки, со стороны индуктивности — волновому сопротивлению  $T$ -образной ячейки.

**Выбор схемы ячеек гасителя.** Все ячейки в полосе гашения (см. 10.11) имеют мнимое волновое сопротивление ( $T$ -образное — индуктивное,  $\Pi$ -образное — емкостное). Из формул (1) — (4) видно, что при заданных величинах коэффициента собственного затухания и степени несимметричности фильтра, сильное влияние на величину  $k_{вн}$  оказывают члены, характеризующие взаимодействие гасителя с присоединенной системой. Как следует из рис. 2, величина этих членов зависит как от отношения модулей сопротивлений присоединенной системы и волнового сопротивления гасителя, так и от фазы этого отношения. Когда фаза мало отличается от  $180^\circ$  и отношение модулей близко к 1,

$$K_{отр} = \frac{1}{2} \left| 1 + \frac{z_{\Pi}}{z_{c2}} \right| \ll 1,$$

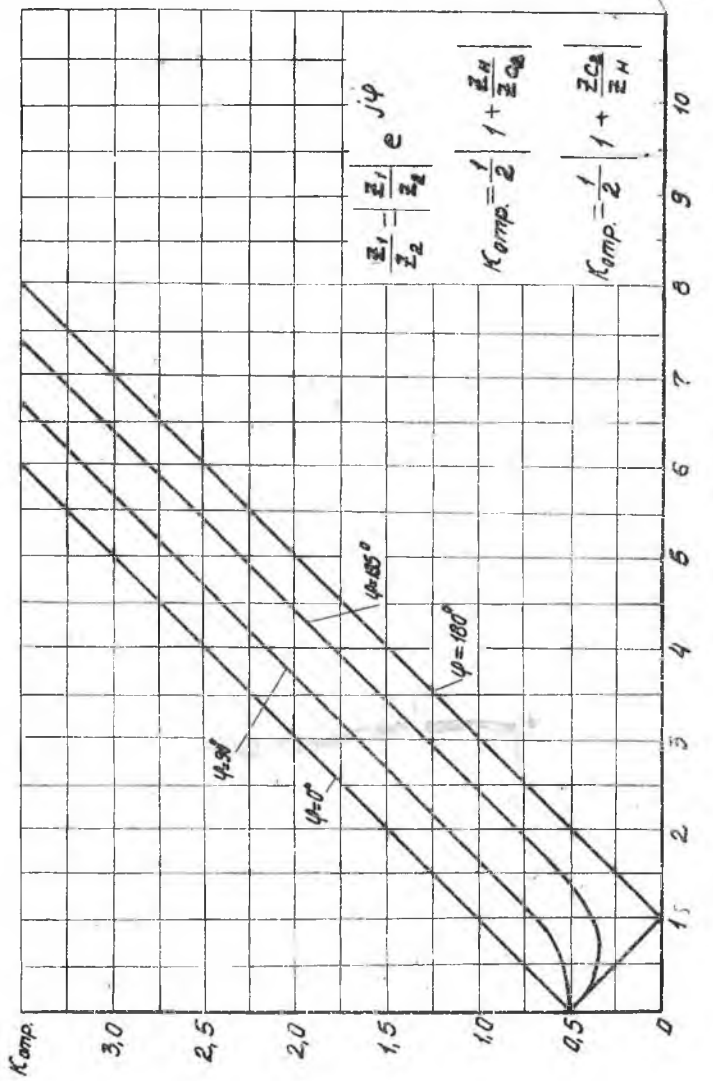


Рис. 2.

что приводит к уменьшению  $k_{\text{вн}}$  или даже к усилению колебаний ( $k_{\text{ин}} < 1$ ).

Исходя из анализа кривых, можно сказать, что независимо от отношения модулей необходимо стремиться к  $\varphi = 0$ . Последнее равенство может быть обеспечено соответствующим выбором схемы ячейки гасителя.

Когда сопротивление присоединенной системы имеет индуктивный характер, желательно применение Т-образной или Г-образной ячейки, включенной индуктивностью в сторону системы. Соответственно, когда сопротивление системы имеет емкостный характер — П-образной или Г-образной ячейки, включенной в обратном направлении. Если сопротивление системы имеет активный или знакопеременный характер в заданной полосе гашения, то возможно применение всех типов ячеек. Необходимая величина затухания, обусловленная взаимодействием гасителя с системой, обеспечивается выбором модуля волнового сопротивления гасителя со стороны системы, исходя из условия

$$\left| \frac{z_c}{z_n} \right| \cong m$$

в заданной полосе гашения по частоте, где  $m$  — наперед заданное, положительное число.

Влияние характера источника колебания сводится к следующему.

При значениях коэффициента собственного затухания 3,5—4 и более (что характерно для полосы непропускания) входное сопротивление системы совместно с гасителем практически равно волновому сопротивлению гасителя со стороны источника колебаний. Для уменьшения пульсационных потерь мощности насосной установки (случай источника переменного расхода) необходимо иметь малое входное сопротивление, т. е. в случае  $z_{\text{ист}} = \infty$ , как это следует из формул (10), (11), желательно применение П-образной или соответственно включенной Г-образной ячейки.

Для источника давления возможно использование Т-образной или Г-образной ячейки, включенной в обратном порядке. Применение П-образной ячейки нерационально, так как емкость, подключенная к источнику переменного давления, практически не работает.

Исходя из анализа влияния на схему гасителя характера нагрузки и типа источника колебаний можно составить следующие рекомендации:

а) Для источника переменного давления.

При индуктивном характере нагрузки — Т-образная ячейка.

При емкостном характере нагрузки — Г-образная ячейка.

В случае активного или знакопеременного характера сопротивления системы возможно применение Т-образной и Г-образной ячейки. Более выгодным оказывается применение Г-образной ячейки, ибо при одинаковой характеристике собственного затухания и

волнового сопротивления со стороны источника колебаний она дает дополнительное затухание за счет несимметричности. Действительно, при одинаковых габаритах с Т-образной ячейкой собственное затухание для Г-образной ячейки определяется формулой

$$K_c = 2\eta + \sqrt{4\eta^2 - 1}.$$

Затухание за счет несимметричности

$$\left| \sqrt{\frac{z_{c_1}}{z_{c_2}}} \right| = \sqrt{4\eta^2 - 1}.$$

В связи с тем, что члены, характеризующие взаимодействие гасителя с системой, для Т- и Г-образных ячеек можно подобрать одинаковыми, отношение коэффициентов вносимого затухания для них таково:

$$\frac{K_{внГ}}{K_{внТ}} = \frac{4\eta^2 - 1 + 2\eta\sqrt{4\eta^2 - 1}}{2\eta^2 - 1 + 2\eta\sqrt{\eta^2 - 1}},$$

откуда видно, что

$$K_{внГ} > K_{внТ}.$$

б) Для источника переменного расхода.

При емкостном характере нагрузки — П-образная ячейка, при индуктивном характере нагрузки — Г-образная ячейка, при активном или знакопеременном характере нагрузки — Г-образная ячейка, исходя из условия получения дополнительного затухания.

**Определение числа ячеек и расчет геометрических размеров.** Под многозвенным понимается гаситель, составленный из  $n$  одинаковых ячеек.

Гаситель как пассивный четырехполюсник может быть однозначно определен заданием трех независимых параметров  $z_{c_1}$ ,  $z_{c_2}$ ,  $K_c$ .

Величина и характер волновых сопротивлений выбираются в зависимости от типа источника колебаний, характера и величины нагрузки.

Одинаковая величина собственного затухания на заданной частоте, при заданной величине  $R$ , которая в основном определяет влияние конструкции на величину волнового сопротивления, может быть получена как однозвенным, так и многозвенным гасителем.

Формула для определения собственного затухания многозвенного гасителя из Т- и П-образных ячеек имеет вид

$$K_c = (\eta + \sqrt{\eta^2 - 1})^{2n}. \quad (13)$$

Из сравнения формул (8) и (13) видно, что заданная величина собственного затухания на заданной частоте в однозвенном гасителе может быть получена при  $\eta$  больших, чем для многозвенного, т. е. при заданных  $k_c$ ,  $f$  граничная частота многозвенного гасителя выше, а размеры ячейки, как это следует из формулы (7), меньше,

чем однозвенного. Однако габариты многозвенного гасителя могут быть больше или меньше, чем однозвенного за счет применения п ячеек.

При заданных  $k, f, R$  число ячеек выбирается из условия получения наименьших размеров гасителя. За основной параметр, характеризующий размеры, принимается суммарный объем гасителя

$$V_{\Sigma} = V_i \cdot n, \quad (14)$$

$V_i$  — объем полости ячейки.

Нормированная частота многозвенного гасителя в этом случае равна

$$\eta_i = \frac{j \cdot \pi}{c} \sqrt{\frac{V_i l_i}{S_i}}, \quad (15)$$

где  $l_i$  — длина соединительной трубки ячейки,

$S_i$  — площадь поперечного сечения соединительной трубки ячейки  
Величина

$$R = \rho c \sqrt{\frac{l_i}{S_i V_i}}. \quad (16)$$

Из (14), (15), (16) следует

$$\eta_i = \frac{j \cdot \pi \cdot R}{\rho c^2} \cdot \frac{V_{\Sigma}}{n}, \quad (17)$$

$$K_c = \left[ \frac{j \cdot \pi \cdot R}{\rho c^2} \cdot \frac{V_{\Sigma}}{n} + \sqrt{\left( \frac{j \cdot \pi \cdot R}{\rho c^2} \cdot \frac{V_{\Sigma}}{n} \right)^2 - 1} \right]^{2n}. \quad (18)$$

Решая равенство (18) относительно  $V_{\Sigma}$ , получим

$$V_{\Sigma} = \left( K_c^{\frac{1}{2n}} + K_c^{-\frac{1}{2n}} \right) \cdot n \cdot \frac{\rho c^2}{2 \cdot \pi R}. \quad (19)$$

Так как величины  $K_c, f, R$  заданы, а  $\rho$  и  $c$  постоянные, имеем

$$V_{\Sigma} = \varphi(n). \quad (20)$$

Число ячеек, при котором достигается минимальный суммарный объем, определяется из равенства

$$\frac{dV_{\Sigma}}{dn} = 0. \quad (21)$$

Используя (19) ÷ (21), получим,

$$2n \frac{K_c^{\frac{1}{2n}} + 1}{K_c^{\frac{1}{2n}} - 1} = \ln K_c. \quad (22)$$

Графическое решение уравнения (22) представлено на рис. 3 до значений  $K_c = 140$ . Из него видно, что для  $K_c \leq 11$  оптимальным

является применение однозвенного гасителя, для  $K_c$  от 11 до 121 возможно применение однозвенных и двухзвенных гасителей, для значений  $K_c > 121$  — двух- и трехзвенных гасителей.

Для более точного выяснения полос значений  $K_c$ , при которых оптимально применение однозвенных или двухзвенных гасителей, проведено формальное решение уравнения (22) для  $n=1,5$  и принято, что для  $n > 1,5$  выгодным является применение двухзвенных гасителей, для  $n < 1,5$  — однозвенных.

Таким образом, для значения  $K_c \leq 37$  оптимальным с точки зрения наименьших габаритов, является применение однозвенных гасителей, для  $K_c \geq 37$  — применение двухзвенных гасителей.

Уравнение (22) справедливо также для определения оптимального числа звеньев в гасителе, составленном из Г-образных ячеек.

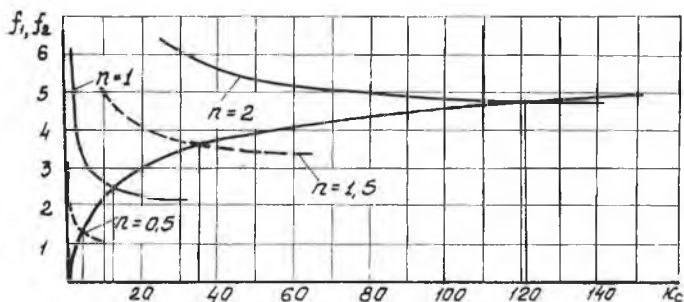


Рис. 3.

Решение уравнения в этом случае необходимо искать для значений  $n=0,5; 1,5; 2,5$  и т. д., а формальное разделение полос производить при  $n=1, 2, 3$  и т. д.

Как видно из рис. 3, для  $K_c \leq 11$  оптимальными являются несимметричные гасители из одной Г-образной ячейки, для  $11 \leq K_c \leq 121$  — из трех Г-образных ячеек, для  $K_c \geq 121$  — из пяти Г-образных ячеек.

Расчет геометрических размеров сводится к определению  $l_i, S_i, V_i$ . Как правило, величина площади проходного сечения соединительной трубки выбирается исходя из условия пропускания стационарной составляющей расхода среды с малыми потерями.

При заданном  $K_{\text{нн}}$  выбираются  $K_c$  и  $K$ , обеспечивающие получение требуемого сглаживания. При известных  $R, K_c, f, S_i$  величины  $l_i$  и  $V_i$  определяются из совместного решения уравнений (13), (15), (16).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Шорин. К вопросу о гашении колебаний давления в гидравлических системах летательных аппаратов и двигателей. Труды КуАИ, вып. XXX, Куйбышев, 1967.
2. Н. Д. Босый. Электрические фильтры. Гостехиздат УССР, 1955.