

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ

© 2004 А.Н. Головин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Одним из методов устранения колебаний рабочей среды в трубопроводных системах машин является применение акустических гасителей. Гасители изменяют динамические свойства систем и структуры волновых процессов. В статье показано, что для эффективного применения гасителей необходимо учитывать характеристики источников колебаний и нагрузок или применять такие устройства, которые обеспечивают гарантированное ослабление колебаний в трубопроводных цепях с любыми динамическими свойствами.

Распространяющиеся в трубопроводах колебания давления и расхода, образуют совокупность бегущих и стоячих волн. Введение в трубопроводную систему гасителя изменяет ее динамические свойства. Происходит трансформация волнового процесса. В результате перераспределяются амплитуды колебаний давления и расхода на участке системы до гасителя и на участке системы после гасителя. Очевидно, что на входном участке амплитуды колебаний зависят от входного импеданса гасителя. На выходном участке структура волнового процесса более сложная. Она определяется отражениями в сечениях стыка до гасителя и за гасителем и его аккумулятивными и демпфирующими свойствами. Причем характеристики гасителя, системы и все изменения в волновом процессе взаимосвязанные.

Задача влияния гасителей на колебания в выходном участке системы известна как задача о вносимом затухании и наиболее пол-

но изучена в работе [1] при сосредоточенных параметрах гасителя. Допущение о сосредоточенности параметров позволило упростить формулу коэффициента вносимого затухания  $K_{вн}$ , но одновременно с этим была потеряна оценка влияния волнового процесса на вносимое затухание. Для устранения недостатков существующей модели  $K_{вн}$  исследуем соответствующие зависимости при распределенных параметрах гасителя и системы.

Рассмотрим это подробно.

Установим в произвольную трубопроводную систему, рис. 1а, имеющую независимый источник колебаний с импедансом  $Z_{и}$  вместо отрезка трубопровода длиной  $\ell$  с активным волновым сопротивлением  $Z_{в}$ , гаситель колебаний произвольной структуры. После введения гасителя амплитуды колебаний давления и переменного расхода рабочей жидкости в системе изменятся. Расчетная схема для определения их изменения изображена на рис. 1б.

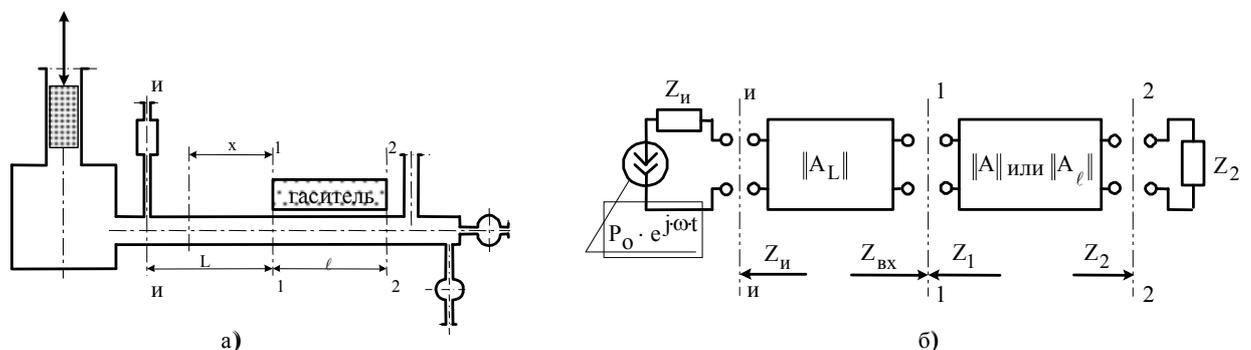


Рис. 1. Гидравлическая и расчетная схемы трубопроводной цепи:

На расчетной схеме параметром  $\|A\|$  без дополнительных обозначений и с подстрочными индексами  $l$  и  $L$  обозначены, соответственно, матрицы передачи: гасителя, "удаляемого" отрезка трубопровода и трубопровода, соединяющего источник колебаний с гасителем

На схеме:

– часть трубопроводной системы, расположенная слева от гасителя (входной участок), характеризуется входным импедансом  $Z_1 = Z_1(\omega)$ ;

– часть трубопроводной системы, расположенная справа от гасителя (выходной участок) характеризуется входным импедансом  $Z_2 = Z_2(\omega)$ .

Используя результаты работ [1], запишем выражения для амплитуд колебаний давления, которые были в сечении 2-2 (рис. 1б) до установки гасителя и стали в этом сечении трубопроводной системы после его установки (соответственно для  $P_2^*$  и  $P_2^{**}$ ):

$$P_2^* = P \times \frac{2 \cdot Z_2 \cdot Z_g}{e^{\gamma_{mp}} \cdot [(Z_1 + Z_g) \cdot (Z_2 + Z_g) - e^{-2\gamma_{mp}} \cdot (Z_g - Z_2) \cdot (Z_g - Z_2)]} \quad (1)$$

$$P_2^{**} = P \times \frac{2 \cdot Z_2 \cdot \sqrt{Z_{c2} \cdot Z_{c1}}}{e^{\gamma_r} \cdot [(Z_1 + Z_{c1}) \cdot (Z_2 + Z_{c2}) - e^{-2\gamma_r} \cdot (Z_{c2} - Z_2) \cdot (Z_{c1} - Z_1)]} \quad (2)$$

где:  $i = 1$  или  $i = 2$ ;  $Z_{ci} = Z_{ci}(\omega)$  – волновое сопротивление гасителя;  $\gamma_{\delta\delta} = \gamma_{\delta\delta}(\omega)$  – постоянная передачи трубопровода, в который устанавливается гаситель;  $\gamma_{\bar{a}} = \gamma_{\bar{a}}(\omega)$  – постоянная передачи гасителя.

Подставим выражения (1) и (2) в формулу для  $K_{BH}$  (3).

$$K_{BH} = \frac{P_2^*}{P_2^{**}} \quad (3)$$

После соответствующих преобразований получим:

$$K_{BH} = \frac{K_c}{K_{cmp}} \cdot \left| \sqrt{\frac{Z_g}{Z_{c1}}} \right| \cdot \left| \frac{Z_1 + Z_{c1}}{Z_1 + Z_g} \right| \cdot \left| \sqrt{\frac{Z_g}{Z_{c2}}} \right| \cdot \left| \frac{Z_2 + Z_{c2}}{Z_2 + Z_g} \right| \times$$

$$\left| 1 - \frac{e^{-j \cdot 2 \cdot \varphi_r}}{K_c^2} \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_{c1}}{Z_1 + Z_{c1}} \right) \cdot \left( \frac{Z_2 - Z_{c2}}{Z_2 + Z_{c2}} \right) \right| \cdot \left| 1 - \frac{e^{-j \cdot 2 \cdot \varphi_{TP}}}{K_{cmp}^2} \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_g}{Z_1 + Z_g} \right) \cdot \left( \frac{Z_2 - Z_g}{Z_2 + Z_g} \right) \right| \quad (4)$$

где:  $|e^{\gamma_{TP}}| = K_{cmp}$ ;  $|e^{\gamma_r}| = K_c$ ;  
 $K_{cmp} = K_{cmp}(\omega)$ ;  $K_c = K_c(\omega)$  – коэффициенты собственного затухания удаляемого отрезка трубопровода и гасителя;  
 $\varphi_r = \varphi_r(\omega)$ ;  $\varphi_{TP} = \varphi_{TP}(\omega)$  – характеристические фазовые сдвиги гасителя и удаляемого отрезка трубопровода;

$$\varphi_r(\omega) = \arg[e^{\gamma_r(\omega)}] = \arg[\sqrt{A(\omega)D(\omega)} + \sqrt{B(\omega)C(\omega)}]$$

$$\varphi_{TP} = \frac{\omega \cdot \ell}{\alpha}; \alpha - \text{скорость звука; } j = \sqrt{-1}.$$

В общем случае, при известных характеристиках системы, выражение (4) позволяет:  
 – определить эффективность действия гасителей конкретных схем или  
 – определить характеристики гасителя, необходимые для обеспечения требуемой величины  $K_{BH}$  и синтезировать структуру гасителя.

Для решения этих задач необходимо знать зависимости входных импедансов участков системы  $Z_i$ . Однако их определение на практике затруднено и ограничено в большинстве случаев лишь приближенными оценками. Поэтому проведем анализ выражения (4) с целью его упрощения и отыскания способов выбора типа гасителя и его характеристик при ограниченной или неполной информации о динамических свойствах и характеристиках системы. Это также позволит получить обобщенные рекомендации проектирования гасителей для систем с известными характеристиками.

Введем дополнительные обозначения и, учитывая, что  $K_{CTP} \approx 1$ , формулу (4) запишем в виде

$$K_{BH} \approx K_C \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 \cdot \left( \frac{M}{N} \right). \quad (5)$$

В соотношение (5) входят параметры, которые имеют следующие зависимости:

$$\Theta_i = \left| \sqrt{\frac{Z_B}{Z_{Ci}}} \cdot \frac{Z_i + Z_{Ci}}{Z_i + Z_B} \right| \quad (6)$$

функции взаимодействия гасителя и системы в сечении входа  $i = 1$  и в сечении выхода  $i = 2$ ;

$$M = \left| 1 - \frac{e^{-j \cdot 2 \cdot \varphi_r}}{K_c^2} \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_{c1}}{Z_1 + Z_{c1}} \right) \cdot \left( \frac{Z_2 - Z_{c2}}{Z_2 + Z_{c2}} \right) \right| \quad (7)$$

функция, характеризующая затухание, обусловленное несовпадением входных импедансов участков системы и соответствующих волновых сопротивлений гасителя;

$$N \approx \left| 1 - e^{-j \cdot 2 \cdot \varphi_{TP}} \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_g}{Z_1 + Z_g} \right) \cdot \left( \frac{Z_2 - Z_g}{Z_2 + Z_g} \right) \right| \quad (8)$$

функция, характеризующая затухание, обусловленное несовпадением входных сопротивлений участков системы и волнового сопротивления удаляемого отрезка трубопровода или трубопровода, в который устанавливается гаситель. В формулах (5), (8) знак приближенного равенства стоит из-за пренебрежения активными потерями по длине удаляемого отрезка трубопровода, т.е. принято, что  $K_{CTP} \approx 1$ .

Значения функций "М" и "N" зависят:

"М" – от характеристик гасителя и его места установки в системе;

"N" – от предполагаемого места размещения гасителя в системе и относительной длины  $\bar{\ell} = \ell/\lambda$  удаляемого отрезка трубопровода. Параметр  $\lambda$  – длина волны подавляемых колебаний.

Рассмотрим выражение (7). Перепишем его в следующем виде

$$M = \left| 1 - \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot e^{j\varphi}}{K_c^2} \right| \quad (9)$$

В формуле (9):  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - 2 \cdot \varphi_r$ ;

$$T = \left| \frac{1 - m_{cii} \cdot e^{j\varphi_{cii}}}{1 + m_{cii} \cdot e^{j\varphi_{cii}}} \right|;$$

$$\varphi_i = \arg \left( \frac{1 - m_{cii} \cdot e^{j\varphi_{cii}}}{1 + m_{cii} \cdot e^{j\varphi_{cii}}} \right); m_{cii} = \left| \frac{Z_{ci}}{Z_i} \right|;$$

$$\varphi_{cii} = \arg \left( \frac{Z_{ci}}{Z_i} \right).$$

Из соотношения (9) следует, что на величину функции М влияют параметры  $T_i$ ,  $\varphi_i$  и коэффициент  $K_C$ . Значения  $T_i$ ,  $\varphi_i$ , в свою очередь, определяются параметрами  $m_{cii}$  и  $\varphi_{cii}$ .

В общем случае параметр  $m_{cii}$  может принимать любые значения, определяемые неравенством  $0 \leq m_{cii} \leq \infty$ .

Диапазон изменения аргумента  $\varphi_{cii}$  зависит от характера (инерционный, упругий или активный) импедансов  $Z_{ci}$  и  $Z_i$ . Для определенности будем считать:

– если  $|\varphi_{cii}| \leq \frac{\pi}{2}$ , то импедансы  $Z_{ci}$  и

$Z_i$  одного характера;

– если  $\frac{\pi}{2} < |\varphi_{cii}| \leq \pi$ , то импедансы  $Z_{ci}$

и  $Z_i$  разного характера.

Запишем выражения для параметров  $T_i$  и  $\varphi_i$  в следующем виде:

$$T_i = \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot m_{cii} \cdot \cos \varphi_{cii} + m_{cii}^2}{1 + 2 \cdot m_{cii} \cdot \cos \varphi_{cii} + m_{cii}^2}}; \quad (10)$$

$$\varphi_i = \pm \arccos \frac{1 - m_{cii}^2}{\sqrt{1 + 2 \cdot m_{cii}^2 \cdot \cos 2 \cdot \varphi_{cii} + m_{cii}^4}}. \quad (11)$$

В формуле (11) знак "+" следует выбирать, когда  $\sin \varphi_{cii} \leq 0$ , а знак "минус" при  $\sin \varphi_{cii} \geq 0$ .

Анализ выражения (10) показывает,

что величина коэффициента  $T_i$  с учетом пределов изменения параметров  $m_{cii}$  и  $\varphi_{cii}$ , может изменяться:

при однохарактерном сочетании характеристик – в диапазоне

$$\frac{|1 - m_{cii}|}{1 + m_{cii}} \leq T_i \leq 1 \quad (12)$$

или в пределах

$$0 \leq T_i \leq 1;$$

при разнохарактерном сочетании волновых сопротивлений гасителя и соответствующих входных сопротивлений участков системы, т.е. когда  $\frac{\pi}{2} < |\varphi_{cii}| \leq \pi$ , коэффициент

$T_i$  может принимать значения в диапазоне

$$1 \leq T_i \leq \frac{1 + m_{cii}}{|1 - m_{cii}|} \quad (13)$$

или

$$1 \leq T_i \leq \infty.$$

Аргумент  $\varphi_i$  при изменении величины  $m_{cii}$  в диапазоне  $0 \leq m_{cii} \leq \infty$  в обоих вариантах сочетания характеристик может принимать любые значения в пределах

$$0 \leq |\varphi_i| \leq \pi.$$

На рис. 2а, б приведены графики, иллюстрирующие изменение предельных значений

функций  $T_i$  и  $|\varphi_i|$  в зависимости от параметра  $m_{cii}$  при различных значениях аргумента  $\varphi_{cii}$ . Графики симметричны относительно ординаты и абсциссы со значениями

$T_i = 1, m_{cii} = 1, |\varphi_i| = \frac{\pi}{2}$ . При условиях

$m_{cii} \Rightarrow 0$  и  $m_{cii} \Rightarrow \infty$  диапазон изменения параметров  $T_i$  и  $|\varphi_i|$  сужается, а сами величины стремятся к своим предельным значениям:  $T_i \Rightarrow 1, |\varphi_i| \Rightarrow 0$  или  $|\varphi_i| \Rightarrow \pi$ .

Для исследования возможного диапазона изменения аргумента  $\varphi_r$  воспользуемся известным соотношением, справедливым для пассивных четырехполюсников

$$A(\omega) \cdot D(\omega) - B(\omega) \cdot C(\omega) = 1 \quad (14)$$

и запишем выражение для аргумента  $\varphi_r$  в виде

$$\varphi_r = \arg[\sqrt{\operatorname{Re}[A(\omega)D(\omega)] + j \operatorname{Im}[A(\omega)D(\omega)]} + \sqrt{\operatorname{Re}[A(\omega)D(\omega)] - 1} + j \operatorname{Im}[A(\omega)D(\omega)]] \quad (15)$$

Из анализа формулы (15) следует, что параметр  $\varphi_r$  может изменяться в пределах  $0 \leq \varphi_r \leq \pi$ . При вычислениях аргумента  $\varphi_r$  для конкретной схемы гасителя следует учитывать, что извлечение квадратного корня из комплексного числа действие неоднозначное.

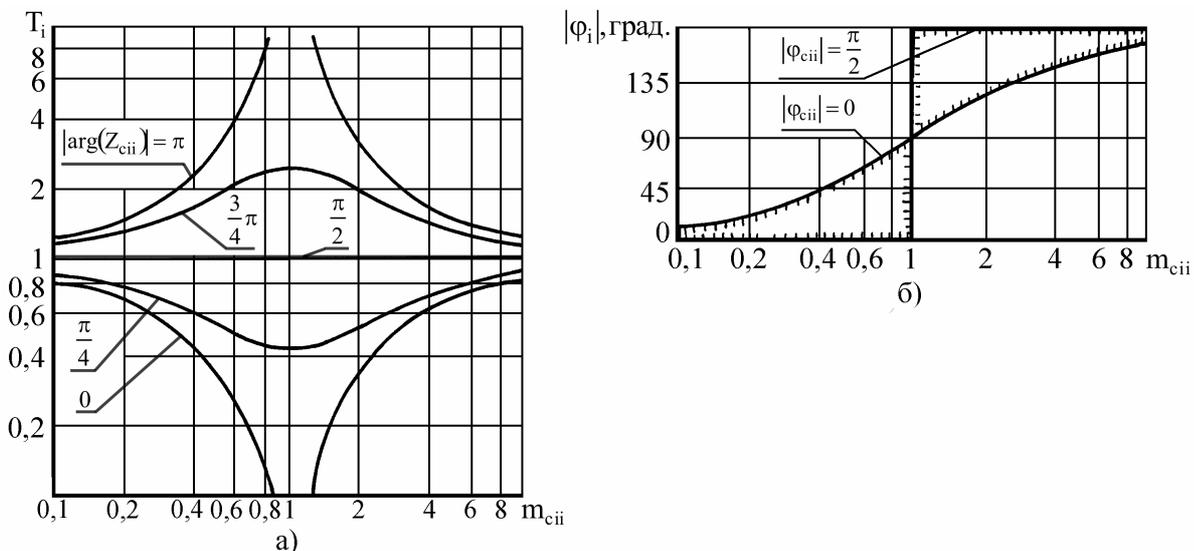


Рис. 2. Зависимости предельных значений параметров  $T$  и  $|\varphi_i|$  от соотношения волновых сопротивлений гасителя и соответствующих им входных импедансов участков системы

Поэтому фактическую величину  $\varphi_r$  можно определить только после дополнительных исследований. Например, построением векторных диаграмм изменения амплитуд давления и расхода в сечениях трубопровода на входе и выходе гасителя.

Проведенный анализ показывает, что параметры  $|\varphi|$  и  $T_1$  в формуле (9), соответственно, могут принимать значения в пределах  $0 \leq |\varphi| \leq 4\pi$  и  $0 \leq T_1 \leq \infty$ . Причем, если на диапазон изменения  $T_1$  оказывает влияние характер  $\varphi_{cii}$ , то на пределы изменения  $\varphi$  данное влияние менее существенно.

На основе полученных результатов определим диапазон и характер изменения функции  $M$ . После алгебраических преобразований соотношение (9) примет вид

$$M = \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{T}{K_c^2} \cdot \cos \varphi + \frac{T^2}{K_c^4}}, \quad (16)$$

где  $T = T_1 \cdot T_2$ .

Допуская реализации предельных значений функции  $\cos(\varphi)$ , запишем в виде неравенства границы возможных изменений функции  $M$  в виде

$$\left| 1 - \frac{T}{K_c^2} \right| \leq M \leq \left| 1 + \frac{T}{K_c^2} \right|. \quad (17)$$

Проведем анализ соотношения (17) при однохарактерных,  $|\varphi_{cii}| \leq \frac{\pi}{2}$ ,  $T \leq 1$ , и разно-

характерных,  $\frac{\pi}{2} \leq |\varphi_{cii}| \leq \pi$ ;  $T > 1$ , сочетаниях, соответствующих характеристик гасителя и примыкающих к нему частей системы.

В первом случае, с ростом значения коэффициента  $K_c$ , границы возможных значений функции  $M$  непрерывно сужаются, а ее величина стремится к единице. Во втором случае диапазон изменения функции  $M$  с возрастанием коэффициента  $K_c$  вначале расши-

ряется, достигая при условии  $T = K_c^2$  значений  $[0; 2]$ , а затем, как и в первом случае, сужается. Функция  $M$  стоит в числителе выражения для  $K_{BH}$  (5). Следовательно, для получения больших значений коэффициента  $K_{BH}$ , необходимо иметь максимальные гарантированные значения функции  $M$ . При одноименных характерах аргументов взаимодействующих характеристик гасителя и системы это будет всегда при условии  $K_c \gg 1$ . При различных характерах взаимодействующих характеристик гасителя и системы большие значения функция  $M$  принимает при значениях коэффициента  $K_c$  много меньших и много больших значений  $\sqrt{T}$ . Иначе, даже при увеличенных значениях коэффициента собственного затухания,  $K_c$ , возможна реализация минимальных значений функции  $M$ . На рис. 3 приведены графики изменения предельных значений функции  $M$  в зависимости от изменения коэффициента  $K_c$  и при различных параметрах комплекса  $T$ .

Выражение для функции  $N$  подобно выражению для функции  $M$ . Ее величина зависит от относительной длины гасителя  $\bar{\ell}$  и места размещения гасителя в трубопроводной системе. Так как гаситель устанавлива-

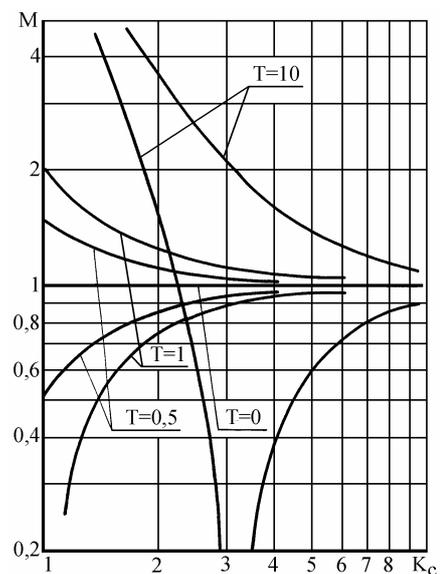


Рис. 3. Зависимости предельных значений функции  $M$  при различных значениях параметра  $T$

ется вместо отрезка трубопровода, волновое сопротивление которого с достаточной для практики точностью принимается активным,

всегда  $\left| \arg \left( \frac{Z_{ci}}{Z_B} \right) \right| \leq \frac{\pi}{2}$ . Поэтому максимально

возможный диапазон изменения коэффициента  $N$  равен  $[0,2]$ , а его границы в зависимости от значения произведения параметров

$$N_1 \cdot N_2: N_1 = \left| \frac{Z_1 - Z_B}{Z_1 + Z_B} \right|; N_2 = \left| \frac{Z_2 - Z_B}{Z_2 + Z_B} \right|, \text{ опре-}$$

деляются следующим неравенством

$$1 - N_1 \cdot N_2 \leq N \leq 1 + N_1 \cdot N_2. \quad (18)$$

Функция  $N$  стоит в знаменателе выражения (5), поэтому для получения наибольшего  $K_{вн}$  необходимо, чтобы значение  $N$  было минимальным или, по крайней мере,  $N < 1$ . Это возможно, например, при установке гасителя, продольные размеры которого много меньше длины волны колебаний в пучности или узле давления. Однако, если частоты колебаний переменны и, следовательно, переменны коэффициенты  $N_1, N_2$ , что характерно, например, для авиационных трубопроводных систем, то расчет гасителя целесообразно вести исходя из худшего случая, чему соответствует максимальное значение  $N=2$ . При этом реальная эффективность гасителя будет всегда не ниже расчетной. Данное упрощение является справедливым также на этапе выбора типа гасителей, так как в формулу для функции  $N$  не входят параметры, определяющие характеристики гасителя.

Рассмотрим функции взаимодействия  $\Theta_i$ . Приведем выражение (6) к виду

$$\Theta_i = \sqrt{\frac{1}{|\bar{Z}_{ci}|} \frac{|\bar{Z}_{ci}|^2 + |\bar{Z}_i|^2 + 2 \cdot |\bar{Z}_{ci}| \cdot |\bar{Z}_i| \cdot \cos(\varphi_{ci} - \varphi_{zi})}{1 + 2 \cdot |\bar{Z}_i| \cdot \cos \varphi_{zi} + |\bar{Z}_i|^2}}, \quad (19)$$

где  $|\bar{Z}_{ci}| = \left| \frac{Z_{ci}}{Z_{\hat{a}}} \right|; \quad |\bar{Z}_i| = \left| \frac{Z_i}{Z_{\hat{a}}} \right|;$

$\varphi_{ci} = \arg(\bar{Z}_{ci}); \quad \varphi_{zi} = \arg(\bar{Z}_i)$  – соответственно, модули и аргументы волновых со-

противлений гасителя и входных сопротивлений участков системы.

Примем в формуле (19) возможные предельные значения косинусов и запишем выражения для наименьших и наибольших значений  $\Theta_i$ :

$$\inf \Theta_i = \sqrt{\frac{1}{|\bar{Z}_{ci}|} \frac{|\bar{Z}_i|^2 + |\bar{Z}_{ci}|^2}{1 + 2 \cdot |\bar{Z}_i| + |\bar{Z}_i|^2}}; \quad (20)$$

$$\sup \Theta_i = \sqrt{\frac{1}{|\bar{Z}_{ci}|} \frac{|\bar{Z}_i|^2 + 2 \cdot |\bar{Z}_{ci}| \cdot |\bar{Z}_i| + |\bar{Z}_{ci}|^2}{1 + |\bar{Z}_i|^2}}. \quad (21)$$

Графики функций  $\inf \Theta_i$  и  $\sup \Theta_i$  приведены на рис. 4.

Из анализа графиков следует, что зависимости имеют сложную пространственную конфигурацию с экстремумами и симметричны относительно значений  $|\bar{Z}_i| = 0$  и  $|\bar{Z}_{ci}| = 0$ . Для расчетов и исследований функции  $\inf \Theta_i$  и  $\sup \Theta_i$  следует принимать значения  $|\bar{Z}_i| \geq 0$  и  $|\bar{Z}_{ci}| \geq 0$ . В этой области изменения параметров функции взаимодействия  $\Theta_i$  могут принимать любые значения из диапазона

$$0 < \Theta_i < \infty. \quad (22)$$

Разделим этот диапазон на два интервала. В первом интервале функция  $\Theta_i$  имеет значения в пределах

$$0 < \Theta_i < [\Theta_i], \quad (23)$$

а во втором интервале значения функции  $\Theta_i$  определяются неравенством

$$[\Theta_i] \leq \Theta_i < \infty. \quad (24)$$

В соотношениях (23) и (24) параметр  $[\Theta_i]$  устанавливает допустимую величину функции взаимодействия, которая рассчитывает-

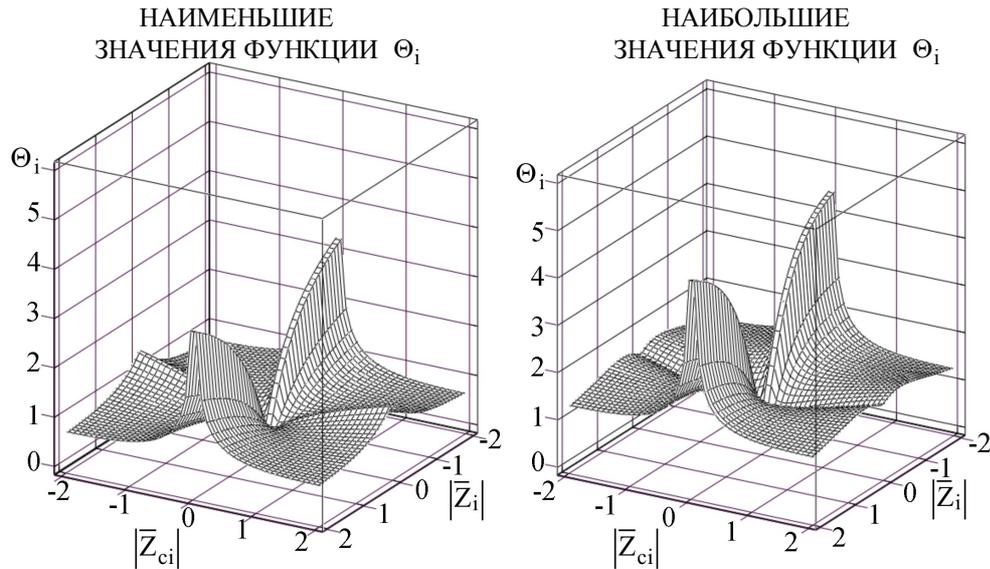


Рис. 4. Зависимости наибольших и наименьших значений функций взаимодействия от изменения волновых сопротивлений гасителя и входных импедансов присоединенных к гасителю частей

ся из соотношения (5) при требуемом коэффициенте вносимого затухания,  $K_{BH}$ .

Условие (24) определяет гарантированное уменьшение амплитуд колебаний за гасителем. Если значения функции  $\Theta_i$  находятся в интервале (23), то амплитуды колебаний вместо уменьшения могут увеличиться и возникнут условия для резонансных режимов в системе.

Исследуем выражение (19) в зависимости от характеристик гасителя, а именно в зависимости от изменения модуля,  $|\bar{Z}_{ci}|$ , и аргумента,  $\varphi_{ci}$ , волнового сопротивления гасителя. В результате получим, что функция (19) при выполнении равенства

$$|\bar{Z}_{ci}| = |\bar{Z}_i| \quad (25)$$

имеет минимум. Формула, описывающая траектории минимальных значений  $\Theta_i$ , имеет следующий вид

$$\min \Theta_i = \sqrt{\frac{2 \cdot |\bar{Z}_{ci}| \cdot [1 + \cos(\varphi_{ci} - \varphi_{zi})]}{1 + 2 \cdot |\bar{Z}_{ci}| \cdot \cos \varphi_{zi} + |\bar{Z}_{ci}|^2}} \quad (26)$$

Параметры функции  $\min \Theta_i$  зависят от величин модуля и аргумента волнового со-

противления гасителя и от аргумента входного импеданса системы. Дальнейшие исследования на экстремумы показывает, что функция выражения (26) при условии

$$|\bar{Z}_{ci}| = 1 \quad (27)$$

принимает наибольшие значения, которые рассчитываются по формуле

$$\sup[\min \Theta_i] = \sqrt{\frac{1 + \cos(\varphi_{ci} - \varphi_{zi})}{1 + \cos \varphi_{zi}}} \quad (28)$$

Функция  $\sup[\min \Theta_i]$  зависит от аргументов  $\varphi_{ci}$  и  $\varphi_{zi}$ , которые могут варьироваться в пределах

$$0 \leq |\varphi_{ci}| \leq \frac{\pi}{2}, \quad (29)$$

$$0 \leq |\varphi_{zi}| \leq \frac{\pi}{2}. \quad (30)$$

Для этих изменений аргументов интервал значений функции  $\sup[\min \Theta_i]$  максимальный и находится в следующих пределах

$$0 \leq \sup[\min \Theta_i] \leq \sqrt{2}. \quad (31)$$

Анализ формулы (28) показывает, что интервал значений функции  $\sup[\min \Theta_i]$ , при уменьшении интервала изменения аргумента  $\varphi_{ci}$ , будет сужаться и при значении аргумента

$$\varphi_{ci} = 0 \tag{32}$$

функция

$$\sup[\min \Theta_i] = 1, \tag{33}$$

то есть становится независимой от акустических характеристик системы.

Условия (27), (32) определяют требования к волновому сопротивлению гасителя, при котором реализуется гарантированное значение  $\sup[\min \Theta_i]$ . Для этого волновое сопротивление гасителя должно быть активным и равным волновому сопротивлению трубопровода, в который устройство будет монтироваться. При таких параметрах гаситель будет эффективно работать в максимально широком диапазоне частот колебаний.

Определим требования к гасителям, когда они проектируются для систем, имеющих специфические динамические характеристики.

Так для гасителя, устанавливаемого в систему с предельными характеристиками, когда  $\bar{Z}_i = 0$  или  $\bar{Z}_i = \infty$ , выражения для функций взаимодействия  $\Theta_i$  следующие:

$$\text{если } \bar{Z}_i = 0, \text{ то } \Theta_i = \sqrt{|\bar{Z}_{ci}|}; \tag{34}$$

$$\text{если } \bar{Z}_i = \infty, \text{ то } \Theta_i = \frac{1}{\sqrt{|\bar{Z}_{ci}|}}. \tag{35}$$

Из соотношений (34) и (35) следует, что если гаситель проектируется для систем с предельными характеристиками (или близкими к ним), то для получения максимальных значений функций  $\Theta_i$  необходимо:

при условии  $|\bar{Z}_i| \Rightarrow 0$  применять гаситель с возможно большей величиной  $|\bar{Z}_{ci}|$ ;

при условии  $|\bar{Z}_i| \Rightarrow \infty$  применять гаситель с возможно меньшей величиной  $|\bar{Z}_{ci}|$ .

На основании проведенных исследований примем  $M \approx 1$  и  $N=2$  и приведем выражение (5) к виду

$$K_{BH} \geq \frac{K_C}{2} \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 \tag{36}$$

и рассмотрим три важнейших случая.

1. Если в выражениях (6) и (19) принять  $Z_{c1} = Z_B$  ( $\bar{Z}_{c1} = 1$ ), то значение функции  $\Theta_1 = 1$ , и соотношение (36) примет вид

$$K_{BH} \geq \frac{K_C}{2} \cdot \Theta_2. \tag{37}$$

Из формулы (37) следует, что минимальная величина вносимого затухания не зависит от импеданса источника колебаний. Гаситель можно проектировать без учета характеристик источника колебаний. Устройство, спроектированное для конкретной гидравлической системы, будет эффективно работать при любых источниках колебаний.

2. Полагаем в выражениях (6) и (19)  $Z_{c2} = Z_B$  ( $\bar{Z}_{c2} = 1$ ). Тогда  $\Theta_2 = 1$  и из (36) получим

$$K_{BH} \geq \frac{K_C}{2} \cdot \Theta_1. \tag{38}$$

Теперь минимальная величина вносимого затухания не зависит от импедансных характеристик нагрузки или присоединенной цепи. Гаситель, спроектированный для конкретного источника колебаний, будет эффективно работать в системе с любыми характеристиками.

3. При значениях волновых сопротивлений  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_B$  функции  $\Theta_1 = \Theta_2 = 1$  и условие эффективности гасителя на выходном участке системы запишется следующим образом

$$K_{BH} \geq \frac{K_C}{2}. \tag{39}$$

В этом случае минимальная величина вносимого затухания определяется только коэффициентом собственного затухания, т.е. схемой и конструкцией самого гасителя. Такой гаситель будет эффективен в любой системе с любым источником колебаний.

Из анализа выражений (36)...(39), с учетом возможного диапазона изменения функции  $\Theta_i$  следует, что гасители, у которых одно волновое сопротивление является активным и равным по величине волновому сопро-

тивлению “удаляемого” отрезка трубопровода, могут быть эффективнее симметричного активного гасителя. Для этого у несимметричного гасителя необходимо выбрать волновое сопротивление с противоположной стороны так, чтобы обеспечивалось наибольшее значение функции  $\Theta_1$  или, по крайней мере,  $\Theta_1 > 1$ .

### Выводы:

1. Для достижения наибольшей эффективности действия гасителя в трубопроводах его волновые сопротивления и соответствующие входные акустические сопротивления участков системы по обе стороны от гасителя должны иметь одинаковый характер. Если входной импеданс участка трубопроводной цепи трудноопределим или изменяется в широких пределах, то необходимо чтобы обращенное в сторону этого участка цепи волновое сопротивление гасителя было активным. Величина активного волнового сопротивления гасителя должна быть равна величине волнового сопротивления “удаляемого” отрезка трубопровода, вместо которого будет установлен гаситель.

2. Показано, что для управления волновыми процессами в трубопроводных системах с произвольными или изменяющимися в широких пределах динамическими характеристиками необходимо применять симметричные гасители с активными волновыми сопротивлениями. Такие гасители являются универсальными. Однако фактическая эффективность действия активных симметричных гасителей определяется величиной коэффициента собственного затухания  $K_c$  и, как правило, невелика. В трубопроводных системах, в которых входные импедансы могут быть измерены или рассчитаны, целесообразно использовать несимметричные гасители. Эффективность действия таких гасителей, за счет дополнительных отражений, выше эффективности действия, которую могут обеспечить симметричные активные гасители.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шорин В.П.* Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980.

## EFFICIENCY DAMPERS OF FLUCTUATIONS

© 2004 A.N. Golovin

Samara State Aerospace University

One of methods of elimination of fluctuations of a working environment in pipeline systems of machines is application acoustic dampers. Dampers change dynamic properties of systems and structures of wave processes. In article it is shown, that for effective application dampers it is necessary to take into account characteristics of sources of fluctuations and loadings or to apply such devices which provide guaranteed easing fluctuations in pipeline circuits with any dynamic properties.