

В. П. ШОРИН

К ВОПРОСУ О ГАШЕНИИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время для гашения колебаний давления в гидравлических системах производят установку в систему дроссельных шайб, гидроаккумуляторов, гибких шлангов и т. д., а также изменение длины или формы магистралей с присоединением к ним глухих отводов.

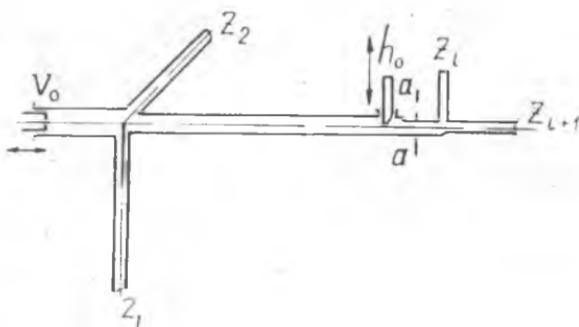
Указанные методы имеют ряд недостатков. Установка дроссельных шайб приводит к ослаблению колебаний, но вместе с тем возникают значительные сопротивления стационарному потоку жидкости. Для обеспечения сглаживания колебаний в широком диапазоне частот требуется значительный объем аккумулятора. Гибкие шланги не всегда могут обеспечить достаточную степень сглаживания колебаний. Изменение длины или формы трубопроводов с присоединением к ним глухих отводов приводит к изменению собственной частоты системы, но резонанс, устраненный на одной из частот, может возникнуть на других, так как частота колебаний рабочей среды в системах значительно изменяется в зависимости от режима работы.

Расчеты и ряд экспериментов показали, что для гашения колебаний в диапазоне частот свыше 150–200 гц (т. е. в диапазоне тех частот, которые наиболее часто встречаются в гидравлических системах, например — роторные частоты шестеренчатых и плунжерных насосов) для более распространенных размеров трубопроводов эффективного гашения колебаний можно достичь с помощью демпфирующих устройств, построенных по принципу акустического фильтра, при достаточно малых их габаритах и малом сопротивлении, оказываемом ими стационарному потоку жидкости.

Следует заметить, что гасители подобного типа с успехом применяются для устранения колебаний газа в коммуникациях компрессоров [1], [2] и в шумоглушении [3].

Для гасителей пульсаций, построенных по принципу акустического фильтра, применяются в основном три метода расчета: метод граничной частоты, метод четырехполюсника, нагруженного на неотражающее сопротивление и метод плоских волн. Все вышеуказанные методы имеют ряд существенных недостатков [2], основной из которых заключается в том, что расчет демпфирующего устройства производится без учета характеристик системы, в которую оно устанавливается. Наличие этого недостатка, не говоря уже о других, за редким исключением делает возможным применение указанных методов к расчету гасителей для гидравлических систем летательных аппаратов и двигателей, так как демпфирующее устройство в этом случае оказывается нагруженным несогласованными сопротивлениями, характер и величина которых изменяются весьма сложно в зависимости от частоты. Несогласованность сопротивлений и параметров демпфирующего устройства приводит к появлению дополнительных отражений на входе и выходе демпфирующего устройства, которые оказывают значительное влияние на степень сглаживания пульсаций.

Для оценки работы демпфирующего устройства, исходя из вышеуказанного, необходимо применять параметр: затухание колебаний давления, вносимое демпфером в систему (вносимое затухание).

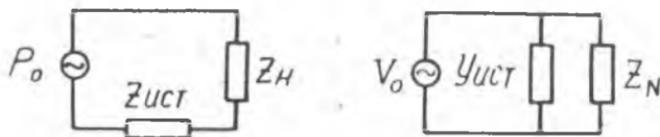


Фиг. 1.

Рассмотрим гидравлическую систему (фиг. 1), содержащую один или несколько независимых источников колебаний одинаковой частоты (источники переменного расхода или давления, а также источники, работающие по принципу изменения гидравлического сопротивления), в которую в произвольном сечении $a-a$ для гашения колебаний справа от сечения устанавливается демпфирующее устройство.

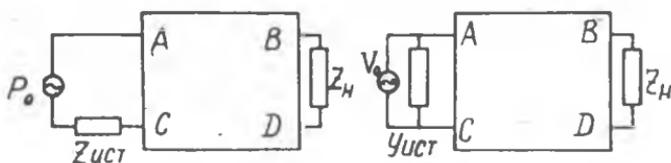
Под вносимым затуханием понимается отношение амплитуды колебаний давления в правой (относительно сечения $a-a$) части системы до установки демпфирующего устройства к амплитуде колебаний давления в той же части после постановки демпфирующего устройства. Согласно теореме Тевенена для акустических

цепей [4] левую от сечения $a-a$ часть исходной цепи можно представить в виде эквивалентного источника колебаний давления с акустическим импедансом $z_{ист}$ (или в виде эквивалентного источника колебаний расхода с акустической проводимостью $y_{ист}$), соединенного непосредственно с правой частью, характеристики которой определены импедансом z_H (рис. 2). Включение в систему



Фиг. 2.

демпфирующего устройства (в линейной постановке задачи) эквивалентно введению в цепь, изображенную на фиг. 2, некоторого пассивного четырехполюсника с параметрами A, B, C, D (фиг. 3).



Фиг. 3.

Затухание, вносимое четырехполюсником в систему, используя методы теории линейных цепей, можно записать в виде:

$$K_{вн} = K_{собств} \cdot \frac{K_{отр. вых} \cdot K_{отр. вх}}{K_{отр. н}} \cdot \left| 1 - P_1 \cdot P_2 \frac{1}{K_{собств}^2 e^{2\varphi}} \right|, \quad (1.)$$

где $K_{вн}$ — коэффициент вносимого затухания;

$K_{собств}$ — собственное затухание демпфера (затухание при работе на характеристическое сопротивление),

$$K_{собств} = |\sqrt{AD} + \sqrt{BC}|;$$

$K_{отр. вх} = \left| \frac{z_{c1} + z_{ист}}{2 \sqrt{z_{c1} z_{ист}}} \right|$ — коэффициент, характеризующий затухание, обусловленное отражением на входе демпфирующего устройства;

$K_{отр. вых} = \left| \frac{z_{c2} + z_H}{2 \sqrt{z_{c2} z_H}} \right|$ — коэффициент, характеризующий затухание, обусловленное отражением на выходе демпфирующего устройства;

$K_{отр. н} = \left| \frac{z_n + z_{ист}}{2\sqrt{z_n \cdot z_{ист}}} \right|$ — коэффициент, характеризующий затухание, обусловленное несовпадением импедансов источника колебаний и системы;

P_1 — коэффициент отражения на входе в демпфирующее устройство, $P_1 = \frac{z_{ист} - z_{c1}}{z_{ист} + z_{c1}}$,

P_2 — коэффициент отражения на выходе демпфирующего устройства $P_2 = \frac{z_n - z_{c2}}{z_n + z_{c2}}$;

φ — собственный фазовый сдвиг демпфирующего устройства (фазовый сдвиг при работе на характеристические сопротивления);

$z_{c1} = \sqrt{\frac{AB}{DC}}$ — характеристическое сопротивление демпфера со стороны источника колебаний;

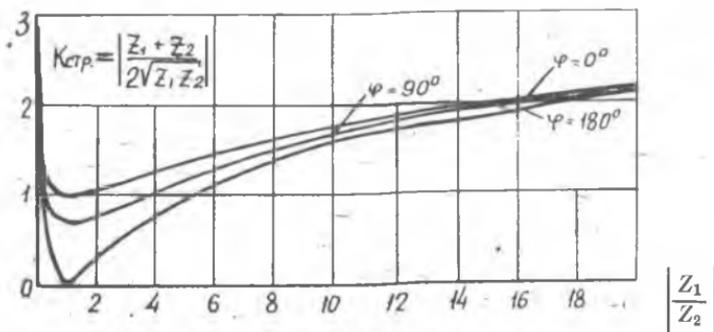
$z_{c2} = \sqrt{\frac{DB}{AC}}$ — характеристическое сопротивление демпфера со стороны системы;

$\left| 1 - P_1 \cdot P_2 \frac{1}{K_{собств}^2 \cdot e^{2\varphi}} \right|$ — характеризует затухание, обусловленное взаимодействием отражений на входе и выходе демпфирующего устройства.

В полосе гашения (т. е. той полосе, на которую рассчитывается демпфер и где собственное затухание в демпфере довольно велико) этим членом можно пренебречь и формула вносимого затухания примет вид:

$$K_{вн} = K_{собств} \frac{K_{отр. вх} \cdot K_{отр. вых}}{K_{отр. н}} \quad (2)$$

На фиг. 4 представлены кривые, характеризующие затухание, обусловленное отражением в зависимости от отношения модулей сопротивлений при различных углах сдвига фаз. Из графиков следует, что величина затуханий за счет отражений может изменяться от нуля до бесконечности, т. е. при определенных условиях явления отражения могут вызвать не уменьшение, а увеличение



Фиг. 4.

амплитуды колебаний. Таким образом, в полосе гашения, рассчитанной по формулам, не учитывающим характеристик системы, в действительности может наблюдаться увеличение амплитуды колебаний. Это физически объясняется тем, что при определенном соотношении между характеристическими сопротивлениями, сопротивлениями источника колебаний и системы создаются условия передачи в систему большей колебательной мощности, по сравнению с той, которая воспринимается при непосредственном соединении системы с источником колебаний.

При установке демпфера непосредственно у источника переменного расхода (например, около шестеренчатого или плунжерного насоса)

$$K_{\text{вн}} = K_{\text{собств}} \cdot K_{\text{отр. вых}} \cdot K_{\text{изм. м}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{изм. м}} = \sqrt{\frac{z_{\text{н}}}{z_{\text{с}}}}$ — характеризует изменение колебательной мощности, поступающей в систему, ибо мощность в этом случае определяется только характеристикой присоединяемой к источнику системы.

При установке демпфера непосредственно у источника переменного давления (например, у камеры сгорания)

$$K_{\text{вн}} = K_{\text{собств}} \cdot K_{\text{отр. вых}} \cdot K'_{\text{изм. м}}, \quad (4)$$

где

$$K'_{\text{изм. м}} = \sqrt{\frac{z_{\text{с}}}{z_{\text{н}}}}$$

Затухание, вносимое в систему емкостью (или ответвленным резонатором), определяется формулой:

$$K_{\text{вн}} = \left| 1 + \frac{z_{\text{ист}} \cdot z_{\text{н}}}{z_{\text{с}} (z_{\text{ист}} + z_{\text{н}})} \right|, \quad (5)$$

где $z_{\text{с}}$ — импеданс емкости (или соответственно импеданс ответвленного резонатора)

При установке емкости (резонатора) непосредственно около источника переменного расхода

$$K_{\text{вн}} = \left| 1 + \frac{z_{\text{н}}}{z_{\text{с}}} \right|. \quad (6)$$

Затухание, вносимое в систему дроссельной шайбой

$$K_{\text{вн}} = \left| 1 + \frac{z_{\text{д}}}{z_{\text{ист}} + z_{\text{н}}} \right|, \quad (7)$$

где $z_{\text{д}}$ — импеданс дроссельной шайбы.

При непосредственной установке дроссельной шайбы у источника переменного давления

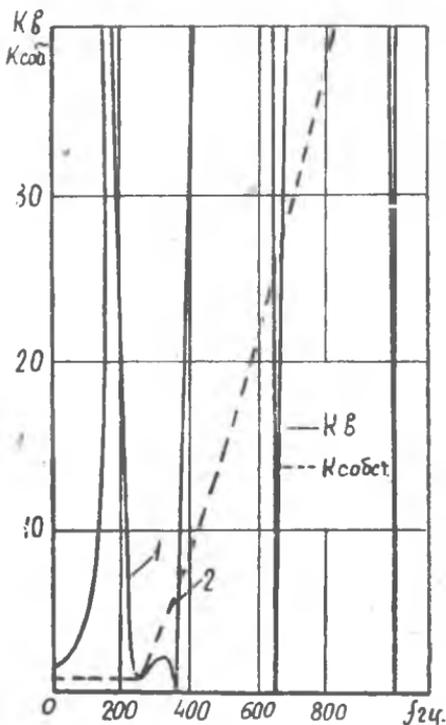
$$K_{\text{вн}} = \left| 1 + \frac{z_{\text{д}}}{z_{\text{н}}} \right|. \quad (8)$$

В качестве примера на фиг. 5 приведена кривая 1 затухания, вносимого демпфирующим устройством (схема и размеры которого приведены на фиг. 6) в систему, изображенную на фиг. 6, при непосредственной установке его за источником переменного расхода. Кривая 2 рассчитана для того же демпфирующего устройства по методу четырехполюсника, нагруженного на неотражающее сопротивление. Из приведенного примера видна явная неприемлемость расчета по методу четырехполюсника, нагруженного на характеристическое сопротивление.

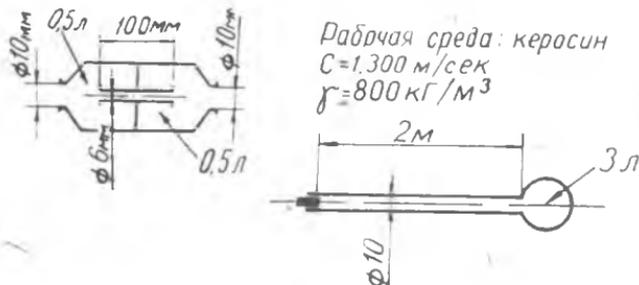
В статье Козобкова и Хачатуряна [5] для оценки эффективности камерных гасителей колебаний при работе их на несогласованные сопротивления введен параметр — коэффициент сглаживания пульсаций — $K.C.$, (в [2] распространяемый на другие типы гасителей), который представляет собой отношение амплитуд колебаний давления на входе в гаситель к амплитуде колебаний давления на выходе из гасителя и определяется по формуле:

$$K.C. = \left| A + \frac{B}{z_{II}} \right| \quad (9)$$

Как показал проведенный анализ, параметр $K.C.$ обладает рядом существенных недостатков и может быть применен для оценки



Фиг. 5.



Фиг. 6.

работы демпфирующего устройства только в некоторых частных случаях.

Отпуская промежуточные выкладки, связь между $K_{вн}$ и $K.C.$ можно представить в виде:

$$\frac{K_{вн}}{K.C.} = \left| \frac{z_n}{z_{ист} + z_n} \right| \cdot \left| \frac{z_{вх} + z_{ист}}{z_{вх}} \right|, \quad (10)$$

где $z_{вх}$ — входной импеданс системы совместно с демпфирующим устройством. Произведение, стоящее в правой части равенства (10), в общем случае может изменяться в очень широких пределах ($0 \div \infty$) и только в случае $z_{ист} = 0$, $K_{вн} = K.C.$ Таким образом, затухание, подсчитанное по формуле (9), равно действительному только в случае установки демпфирующего устройства непосредственно за источником переменного давления. В остальных случаях формула (9) дает погрешность, величина которой может достигать бесконечно большого значения. Покажем это на примере установки демпфирующего устройства непосредственно за источником переменного расхода (наиболее распространенный случай работы демпфера), т. е. когда $z_{ист} = \infty$. Самым опасным режимом работы системы является случай резонанса, что соответствует условию $z_n = \infty$. В этом случае величина сглаживания, подсчитанная по формуле (3), дает значение, равное бесконечности, а величина сглаживания, подсчитанная по формуле (9), дает значение $K.C. = A$, что является неверным, так как в резонансном случае введение демпфера (или какого-либо дополнительного элемента) в систему приводит к конечному значению амплитуды и, следовательно, бесконечно большому затуханию. В связи с этим фактом в статье [5] для оценки эффективности работы камерного гасителя на резонансных режимах рекомендуется применение параметра — коэффициент вносимого затухания (там же приведена формула $K_{вн}$ для одного частного случая). Однако величина погрешности, даваемая формулой (9), может достигать большого значения не только для резонансных случаев, что можно показать на примере установки демпфирующего устройства непосредственно за источником переменного расхода, работающего на бесконечно длинный трубопровод. Связь между $K_{вн}$ и $K.C.$ для этого случая запишется в виде

$$\frac{K_{вн}}{K.C.} = \left| \frac{z_n}{z_{вх}} \right|, \quad (11)$$

где z_n — волновое сопротивление бесконечно длинного трубопровода.

Равенство (11) можно представить в виде

$$\frac{K_{вн}}{K.C.} = \left| \frac{z_n}{z_{сг}} \right| \cdot \frac{1}{M}. \quad (12)$$

Не приводя промежуточных преобразований, выражение для M запишем в конечном виде

$$M = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2 \left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{z_B + z_{c_1}}{z_B - z_{c_1}} \right| + \ln K_{\text{собств}} \right) - \cos 2 \left(\varphi_{\text{собств}} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{z_B + z_{c_1}}{z_B - z_{c_1}} \right)}{\operatorname{ch} 2 \left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{z_B + z_{c_2}}{z_B - z_{c_2}} \right| + \ln K_{\text{собств}} \right) + \cos 2 \left(\varphi_{\text{собств}} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{z_B + z_{c_2}}{z_B - z_{c_2}} \right)}}$$

Величина M может изменяться в пределах от

$$\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{z_B + z_{c_2}}{z_B - z_{c_2}} \right| + \ln K_{\text{собств}} \right) \text{ до } \frac{1}{\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{z_B + z_{c_1}}{z_B - z_{c_1}} \right| + \ln K_{\text{собств}} \right)}$$

Так как минимальное значение

$$\left| \frac{z_B + z_{c_2}}{z_B - z_{c_2}} \right| = 1, \text{ то } \operatorname{th}(\ln K_{\text{собств}}) \leq \operatorname{th} \left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{z_B + z_{c_2}}{z_B - z_{c_2}} \right| + \ln K_{\text{собств}} \right)$$

$$\text{и } \frac{1}{\operatorname{th}(\ln K_{\text{собств}})} \geq \frac{1}{\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{z_B + z_{c_1}}{z_B - z_{c_1}} \right| + \ln K_{\text{собств}} \right)}$$

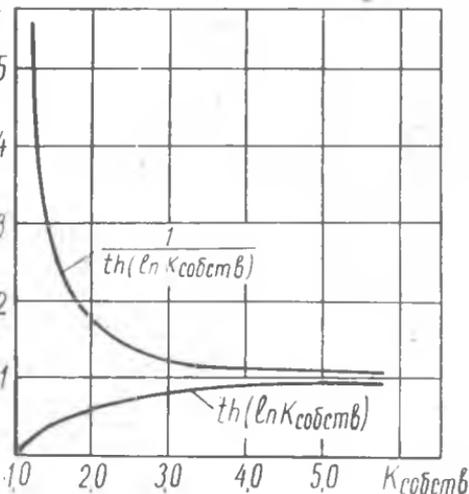
Как видно из фиг. 7, где изображены графики функций

$$\operatorname{th}(\ln K_{\text{собств}}) \text{ и } \frac{1}{\operatorname{th}(\ln K_{\text{собств}})}$$

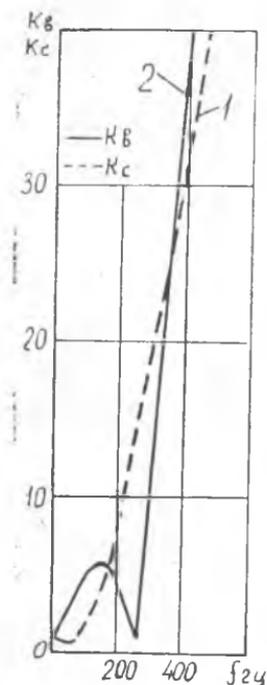
в зависимости от $K_{\text{собств}}$; при значениях $K_{\text{собств}} = 3,5 \div 4$ можно принять приближенно M равным 1, то есть равенство (12) запишется в виде

$$\frac{K_{\text{вн}}}{K_{\text{С}}} = \left| \frac{z_B}{z_{c_1}} \right|, \quad (13)$$

где $\frac{z_B}{z_{c_1}}$ — отношение независимых величин, причем z_{c_1} зависит только от конструкции демпфера и может изменяться в пределах от 0 до ∞ . Таким образом, и в нерезонансных случаях расчеты, проведенные с использованием параметра $K_{\text{С}}$, не могут быть достоверными. На фиг. 8 в качестве примера приведен расчет сглаживания пульсаций в бесконечно длинном трубопроводе диаметром 10 мм с помощью демпфирующего устройства, изображенного на фиг. 6. Кривая 1 характеризует вносимое затухание. Кривая 2 — затухание, подсчитанное по формуле 9.



Фиг. 7.



Фиг. 8

В заключение следует отметить, что параметр $K. С.$ не может быть применен для определения сглаживания колебаний в системе за счет введения в нее емкости или любого ответвленного резонатора, так как в этом случае $K. С.$ всегда равен единице.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены методы расчета демпфирующих устройств для гашения вынужденных колебаний давления в гидравлических системах летательных аппаратов и двигателей. В качестве параметра, характеризующего эффективность работы демпфера, предложен коэффициент вносимого затухания.

2. Проанализирован параметр — коэффициент сглаживания пульсаций, предложенный в работе [5]. Показано, что параметр $K. С.$ может быть использован для оценки эффективности работы демпфера только в случае установившегося его непосредственно за источником переменного давления; в остальных случаях расчеты, произведенные с использованием параметра $K. С.$, могут иметь значительные ошибки.

3. Получены формулы для определения коэффициента вносимого затухания для случаев, наиболее часто встречающихся в практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Гладких, С. А. Хачатурян. Вибрации в трубопроводах и методы их устранения. Машгиз, 1959.
2. П. А. Гладких, С. А. Хачатурян. Предупреждение и устранение колебаний нагнетательных установок. Машиностроение, 1964.
3. Л. И. Инзель. Основы глушения шума выхлопа двигателей внутреннего сгорания. Машгиз, 1949.
4. Ольсон. Динамические аналогии. ИИЛ, 1947.
5. А. А. Козобков, С. А. Хачатурян. Гашение пульсаций давления в трубопроводах компрессорных машин. ИВУЗ «Нефть и газ», № 10, 1962.