

УДК 534.832:62-532.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ  
АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В ТРУБОПРОВОДЕ С НЕСОГЛАСОВАННЫМИ ТОРЦАМИ**

**А. А. Беляков, А. А. Мальцев, С. Ю. Медведев, В. В. Черепенников**

Приведены результаты экспериментального исследования адаптивной системы активного гашения широкополосного акустического поля в трубопроводе с несогласованными торцами. Адаптивная система гашения имела два первичных приемника исходного поля, два гасящих излучателя и два контрольных приемника остаточного поля. С помощью электронных устройств обеспечивались односторонние прием и излучение гидроакустических колебаний. При включенной системе интегральная степень подавления акустического поля в полосе частот 500-2500 Гц в области за системой гасящих излучателей составляла 17 дБ. Исследована эффективность работы ряда упрощенных вариантов системы.

В настоящее время известен целый ряд работ, посвященных экспериментальным исследованиям различных систем активного гашения акустических полей [1-3]. Для автоматической настройки параметров систем активного гашения в [4, 5] было предложено использовать адаптивные алгоритмы. Экспериментально эти алгоритмы достаточно подробно исследовались в задачах гашения узкополосных акустических полей в бассейне [6], воздушном резонаторе [7] и на примере управления граничными условиями в волноводе [8]. В то же время вопрос применения адаптивных алгоритмов для управления системами активного гашения широкополосных акустических полей [9] (особенно при наличии сильной волновой обратной связи, возникающей за счет переотражений от несогласованных границ) исследован недостаточно.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментов по применению активной системы гашения с поисковым алгоритмом адаптации для подавления широкополосного одномерного акустического поля в трубопроводе. Общая блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Трубопровод 1, заполненный пресной водой, был изготовлен из нержавеющей стали (внутренний диаметр сечения 100 мм, толщина стенок 10 мм, общая длина 4,7 мм). Адаптивная система активного гашения состояла из расположенных вдоль оси трубопровода двух первичных приемников исходного поля 2, двух гасящих излучателей 3 и двух контрольных приемников остаточного поля 4. Исходное поле возбуждалось излучателем 5, расположенным в левом торцевом фланце трубопровода. В качестве приемников поля использовались пьезокерамические гидрофоны Брюль и Кьер тип 8103, в качестве излучателей - гидрофоны Брюль и Кьер тип 8100. Первичные приемники 2, разнесенные на расстояние 16 см (порядка четверти минимальной длины волны, возбуждаемой в трубопроводе), совместно с электронным устройством селекции волн (УСВ) 6 позволяли отдельно измерять "падающую" волну, бегущую слева направо, и "отраженную", бегущую справа налево [10]. Неравномерность частотной характеристики

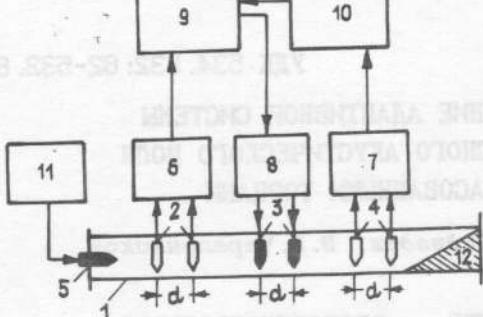


Рис. 1.

измерительного устройства в целом составляла около 3 дБ в диапазоне частот 700 - 2000 Гц, при этом обеспечивалось затухание волны, бегущей в противоположном направлении не менее 20 дБ. Аналогичные характеристики имели и контрольные приемники остаточного поля 4 совместно с УСВ 7. Гасящие излучатели 3 совместно с устройством формирования волн (УФВ) 8 позволяли независимо возбуждать волны, бегущие слева направо и справа налево с затуханием противоположной волны не менее -20 дБ в диапазоне частот 700 - 2000 Гц и неравномерностью частотной характеристики 3 дБ. Сигнал управления гасящими

излучателями 3 синтезировался в адаптивном устройстве формирования гасящего сигнала 9, на вход которого подавался опорный сигнал "падающей" волны, выделенной системой первичных приемников 2 и УСВ 6. Параметры устройства формирования гасящего сигнала 9 задавались микроЭВМ 10 (типа "Нейрон") на основании вычисления мощности остаточной волны, бегущей слева направо и выделенной системой контрольных приемников 4 и УСВ 7. Торцевой излучатель исходного поля 5 возбуждался электрическим сигналом с генератора "белого" шума 11, ширина полосы шумового сигнала задавалась внешним полосовым фильтром в диапазоне частот 700 - 2000 Гц. Высшая частота возбуждаемых гидроакустических колебаний была меньше критической частоты волновода (отрезком которого являлся трубопровод), поэтому в трубопроводе возбуждались только плоские волны с однородной поперечной структурой.

В целях обеспечения более равномерного спектра возбуждаемых гидроакустических колебаний в достаточно широкой полосе частот на правом торце трубопровода был введен клин из звукопоглощающего материала 12. При этом измеренный экспериментально модуль коэффициента отражения от правого торца оказался равным 0,5 - 0,6, а от левого 0,9 - 0,95. Таким образом, несмотря на то, что системы измерителей и излучателей волн имели достаточно высокую степень односторонности, в данном случае имела место сильная волновая обратная связь между гасящими излучателями и первичными приемниками за счет переотражений волн от несогласованных торцов трубопровода.

В качестве адаптивного устройства формирования гасящего сигнала использовался цифровой трансверсальный фильтр, регулируемыми параметрами которого являлись 32 весовых коэффициента. В контрольных экспериментах вместо трансверсального фильтра использовалась также адаптивная линия задержки [11] с регулируемыми временем задержки и коэффициентом усиления. В качестве алгоритма адаптации был выбран наиболее универсальный градиентный поисковый алгоритм. В отличие от алгоритмов с корреляционной обратной связью этот алгоритм не требует для обеспечения устойчивой работы использования дополнительных корректирующих фильтров [9, 12]. Критерием эффективности работы системы служила мощность остаточной волны, бегущей слева направо, в правой части трубопровода. Настройка системы с помощью градиентного поискового алгоритма адаптации осуществлялась за счет изменения весовых коэффициентов (регулируемых параметров) на величину пробных шагов "поисковым" сигналом и одновременного прямого измерения самой мощности остаточной волны. Параметры алгоритма адаптации выбирались оптимальными с точки зрения скорости сходимости

процесса и эффективности гашения исходного поля.

На рис. 2 представлены нормированные спектральные плотности мощности исходного поля (волны, бегущей слева направо) в левой и правой частях трубопровода при выключенной системе гашения. Как видно из рисунка, спектры волн имеют сложный характер, связанный с наличием резонансных частот в трубопроводе. Различие спектров по величине и частично по форме (особенно в диапазоне частот 500 - 1000 Гц) можно, по всей видимости, объяснить присутствием достаточно сильной неоднородной волны вблизи торцевого излучателя исходного поля, в области приемники (расстояние между приемниками было равно примерно одному метру).

Рис. 2.

торого находились первичные торцевым излучателем и первичными одному метру).

Характеристики аддитивной системы активного гашения наиболее подробно исследовались при формировании (с помощью УФВ) "гасящей" волны, бегущей слева направо. На рис. 3 непрерывной линией изображена спектральная плотность мощности остаточного поля (волны, бегущей слева направо) в правой части трубопровода (кривая 1). Для сравнения спектральная плотность мощности исходного поля в правой части трубопровода показана штриховой линией (кривая 2). Видно, что наиболее глубокое подавление достигается в области частот 1100 - 1700 Гц, в которой исходного поля в левой и правой частях трубопровода были наиболее интенсивными и совпадали по форме. Степень гашения в этой области составляла порядка - 20 - 30 дБ. Интегральная степень подавления широкополосного шума в рассматриваемом диапазоне частот 500 - 2500 Гц оказалась равной - 17 дБ.

С целью иллюстрации процесса настройки аддитивной системы гашения на рис. 4 приведена типичная зависимость усредненной интегральной мощности остаточного поля  $\langle \epsilon^2(k) \rangle$  (в процентах от мощности исходного поля) от номера шага адаптации  $k$  после включения системы (так называемая "кривая обучения"). При каждом шаге адаптации, занимающем порядка 90 с, происходила последовательная коррекция всех весовых коэффициентов трансверсального фильтра, формирующего гасящий сигнал. Как видно из рисунка, уже после пятого шага адаптации мощность остаточного поля практически достигала своего минимального значения.

Установившиеся значения весовых коэффициентов  $w_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 32$ ), т. е. импульсная переходная характеристика трансверсального фильтра, представлены на рис. 5. Соответствующие ей амплитудные  $K(f)$  и фазочастотные  $\phi(f)$  характеристики фильтра показаны на рис. 6. Как и следовало ожидать, в области частот, соответствующих максимальному подавлению, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра имеет максимальное значение, а фазочастотная характеристика (ФЧХ) близка к

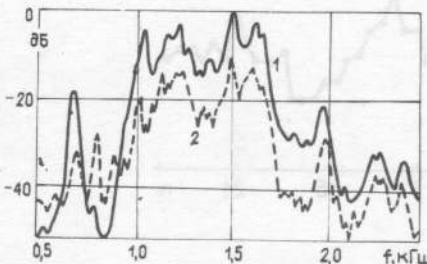


Рис. 2.

торого находились первичные торцевым излучателем и первичными одному метру).

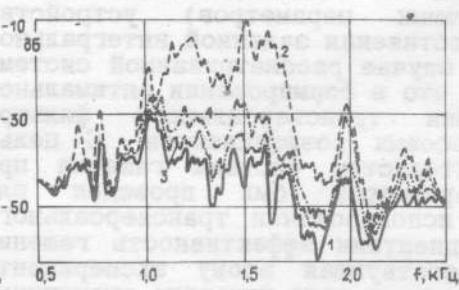


Рис. 3.

спектральные плотности мощности исходного поля в левой и правой частях трубопровода были наиболее интенсивными и совпадали по форме. Степень гашения в этой области составляла порядка - 20 - 30 дБ. Интегральная степень подавления широкополосного шума в рассматриваемом диапазоне частот 500 - 2500 Гц оказалась равной - 17 дБ.

С целью иллюстрации процесса настройки аддитивной системы гашения на рис. 4 приведена типичная зависимость усредненной интегральной мощности остаточного поля  $\langle \epsilon^2(k) \rangle$  (в процентах от мощности исходного поля) от номера шага адаптации  $k$  после включения системы (так называемая "кривая обучения"). При каждом шаге адаптации, занимающем порядка 90 с, происходила последовательная коррекция всех весовых коэффициентов трансверсального фильтра, формирующего гасящий сигнал. Как видно из рисунка, уже после пятого шага адаптации мощность остаточного поля практически достигала своего минимального значения.

Установившиеся значения весовых коэффициентов  $w_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 32$ ), т. е. импульсная переходная характеристика трансверсального фильтра, представлены на рис. 5. Соответствующие ей амплитудные  $K(f)$  и фазочастотные  $\phi(f)$  характеристики фильтра показаны на рис. 6. Как и следовало ожидать, в области частот, соответствующих максимальному подавлению, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра имеет максимальное значение, а фазочастотная характеристика (ФЧХ) близка к

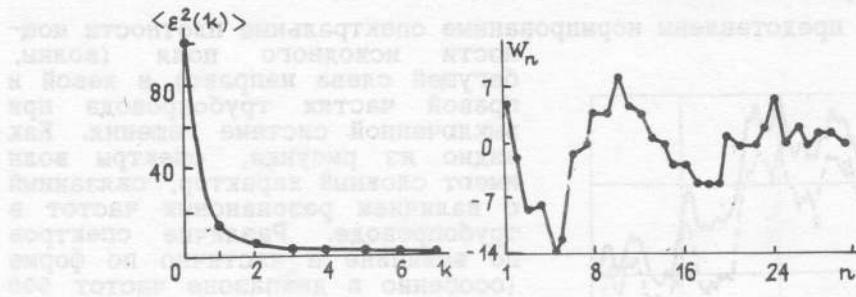


Рис. 4.5.

линейной. Сложная зависимость ФЧХ в области частот ниже 700 Гц и выше 2000 Гц, по всей видимости, объясняется целым рядом причин: нелинейностью ФЧХ устройств селекции и формирования волн, присутствием неоднородной волны в области первичных приемников, наличием дисперсии групповой скорости гидроакустических волн в трубопроводе.

При разработке конкретных систем активного гашения весьма важным представляется решение вопроса о необходимой сложности (структуре и количестве адаптируемых параметров) устройства формирования "гасящего" сигнала для достижения заданной интегральной степени подавления исходного поля. В случае рассматриваемой системы из анализа рис. 5 можно сделать вывод, что в формировании оптимальной импульсной переходной характеристики трансверсального фильтра эффективно используются около 30 весовых коэффициентов. С целью определения степени ухудшения характеристик системы гашения при уменьшении числа адаптируемых параметров был проведен ряд контрольных экспериментов. Так, при использовании трансверсального фильтра только с 16 весовыми коэффициентами эффективность гашения составляла около - 15 дБ. Соответствующая этому эксперименту спектральная плотность мощности остаточного поля показана штрихпунктирной линией (кривая 3) на рис. 3. На этом же рисунке дана спектральная плотность мощности остаточного поля при использовании в качестве устройства формирования гасящего сигнала адативной линии задержки всего с двумя регулируемыми параметрами: временем задержки и коэффициентом усиления (кривая 4). Интегральная степень подавления при этом составила порядка - 12 дБ.

Для выяснения возможности использования упрощенных вариантов системы активного гашения были также проведены эксперименты по исследованию ее работоспособности в случае ненаправленного приема или переизлучения гидроакустических колебаний. При использовании в качестве опорного - сигнала только с одного первичного приемника, но формировании направленной "гасящей" волны (бегущей слева направо) эффективность гашения падала по сравнению с эффективностью рассмотренной ранее полной системы и составляла порядка - 11- 12 дБ. Отметим, что использование одного контрольного приемника остаточного поля практически не влияло на эффективность гашения. При возбуждении только одного ненаправленного гасящего излучателя (монополя), но использовании в качестве опорного - сигнала волны, бегущей слева направо (т. е. сигнала, выделенного системой двух первичных приемников и УСВ), система теряла устойчивость.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Из теоретического анализа известно [9], что адативный трансверсальный фильтр в системе гашения моделирует среду распространения сигнала между первичными приемниками и гасящими излучателями, корректируя при этом характеристики самих приемников и

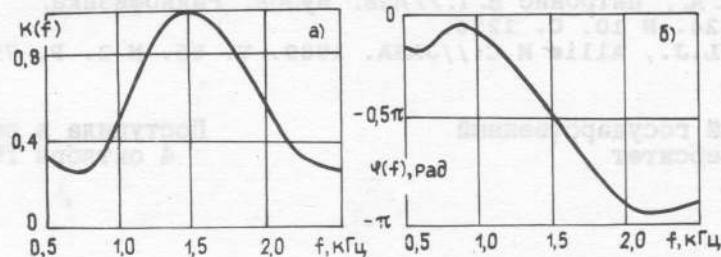


Рис. 6.

излучателей. Можно показать, что использование ненаправленного первичного приемника существенно усложняет эту задачу моделирования. Использование же ненаправленного контрольного приемника на характеристики моделируемой системы практически не влияет. Применение монопольного гасящего излучателя из-за большого коэффициента отражения от левого торца трубы приводит даже в случае направленных первичных приемников к очень сильной волновой обратной связи, близкой к порогу устойчивости, что, по всей видимости, и являлось причиной возбуждения системы в этом случае.

Приведенные в настоящей статье результаты позволяют сделать следующий вывод. Адаптивная система активного гашения широкополосного акустического шума в трубопроводе, использующая в качестве опорного сигнала "падающую" волну и формирующую "гасящую" волну, бегущую в том же направлении, позволяет достичь максимальной эффективности гашения. Использование поискового алгоритма адаптации для настройки весовых коэффициентов автоматически решает достаточно сложную проблему расчета и реализации оптимальной импульсной переходной характеристики трансверсального фильтра, используемого в качестве устройства формирования гасящего сигнала, и дает возможность корректировать изменения характеристик поля, параметров среды и элементов системы гашения в реальном масштабе времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазанников А. А., Тютекин В. В. //Акуст. журн. 1976. Т. 22. № 5. С. 729.
2. Климов С. П., Мазанников А. А., Тютекин В. В. //Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 5. С. 653.
3. La Fontain R.F., Shepherd I.C. //J. Sound Vibration. 1985. V. 100. N 4. P. 569.
4. Burgess J.C. //JASA. 1981. V. 70. N 3. P. 715.
5. Арзамасов С. Н., Мальцев А. А. //Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. N 6. С. 657.
6. Королев И. А., Лепендин В. П. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. N 1. С. 70.
7. Королев И. А., Мальцев А. А., Черепенников В. В. //Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. N 8. С. 1141.
8. Малахов А. Н., Мальцев А. А. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. N 3. С. 327.
9. Арзамасов С. Н., Мальцев А. А. //Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. N 8. С. 1008.
10. Guicking D., Karcher K. //ASME J. Vib. Acoust. Stress Reliability Des. 1984. V. 106. N 3. P. 393.

11. Мальцев А. А., Патронис Е. Т. // Изв. вузов. Радиофизика.  
1981. Т. 24. № 10. С. 1256.  
12. Eriksson L.J., Allie M.C. // JASA. 1989. V. 85. N 2. P. 797.

Нижегородский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
4 октября 1990 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ADAPTIVE SYSTEM FOR ACTIVE  
SUPPRESSION OF THE BROADBAND ACOUSTIC FIELD  
IN A PIPELINE WITH UNMATCHED ENDS

A. A. Belyakov, A. A. Mal'tsev, S. Yu. Medvedev,  
V. V. Cherepennikov

An experimental investigation of an adaptive system for active suppression of the broadband acoustic field in a pipeline with unmatched ends is described. The adaptive system has two primary receivers of initial fields, two suppression sources and two control receivers of residual field. Electronic devices affords unidirectional reception and radiation of hydroacoustic waves. With system of suppression switched on the average integral attenuation of 17 dB was achieved for the frequency range 500 - 2500 Hz in attenuation domain behind suppression sources. The level of average integral attenuation for several simplified schemes of system is investigated.