АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 5

УДК 534.286.

ШИРОКОПОЛОСНАЯ АКТИВНАЯ СИСТЕМА ГАШЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ДВУХМОДОВОМ ВОЛНОВОДЕ

Климов С. П., Мазаников А. А., Тютекин В. В.

В статье рассматривается активная система, осуществляющая гашение поля в волноводе с двумя распространяющимися нормальными волнами. Приведены основные формулы, характеризующие работу широкополосной системы, а также результаты экспериментального исследования.

Задача об активном гашении произвольного стационарного поля в волноводе рассматривалась в работе [1]. Для решения был применен метод Г. Д. Малюжинца, требующий непрерывного распределения монопольных и дипольных приемников и излучателей в двух сечениях волновода и наличия каналов передачи информации (обычно в виде электронных цепей) от каждого приемника к каждому излучателю. Большое число каналов порядка N^2 при аппроксимации непрерывного распределения набором из N приемников и излучателей препятствует практической реализации такой активной системы (судя по литературным данным, экспериментальные исследования подобных систем не проводились). В ряде работ был развит другой подход, основанный на разложении поля по пространственным гармоникам (нормальным волнам волновода [2, 3], сферическим функциям в трехмерном пространстве [4]), позволяющий на порядок снизить число каналов, необходимых для работы активной системы при сохранении ее устойчивости. В работе [5] приведены некоторые экспериментальные результаты, полученные для активной системы, построенной по указанному принципу и осуществляющей гашение монохроматического поля в волноводе с двумя распространяющимися нормальными волнами. В настоящей статье приведены результаты исследования аналогичной широкополосной активной системы. Принципы работы таких систем излагались ранее [3, 5, 6], поэтому в теоретической части ограничимся лишь сводкой основных формул, содержащих все частотно-зависимые множители и относящихся к конкретному волноводу, использованному в эксперименте.

Рассмотрим волновод $\{-\infty<x<\infty,\ 0\leqslant y\leqslant H\}$, с граничными условиями $\partial p/\partial y|_{y=0}=p|_{y=H}=0$. В областях $x<-l$ и $x>L+l$ расположены источники звука f_1 и f_2, создающие поле, спектральные составляющие которого удовлетворяют уравнению Гельмгольца. В области $-l<x<L+l$ свободной от источников, спектр давления имеет вид: $p=p^++p^-=\sum\limits_{n=1}^{N}[A_n^+e^{ik_nx}+A_n^-e^{-ik_nx}]\psi_n(y)$, где A_n^+ и A_n^- амплитуды нормальных волн, созданных источниками f_1 и f_2 соответственно, $k_n^2=\omega^2/c^2-(\pi^2(2n-1))^2/4H^2$, $\psi_n(y)=\cos(\pi y(2n-1))/2H$ — собственные функции поперечного сечения. Быстро затухающие неоднородные волны не учитываются.

В сечениях $x=-l$ и $x=0$ волновода в точках y_n $n=1,\ldots N$ расположим по N точечных приемников, создающих на электрической стороне напряжения, пропорциональные давлению в соответствующих точках с коэффициентом пропорциональности, равным единице. По показаниям этих приемников можно определить величины A_n^+ [3, 5]:

$$A_n^+=\frac{e^{ik_nl}\sum\limits_{m=1}^{N}\beta_{nm}V_{0,m}-\sum\limits_{m=1}^{N}\beta_{nm}V_{-l,m}}{2i\sin k_nl},$$

где $V_{0,m}$ и $V_{-l,m}$ — напряжения на приемниках из сечений $x=0$ и $x=-l$ соответственно, β_{nm} — элементы матрицы, обратной к $\|\psi_n(y_m)\|$ (детерминант этой матрицы предполагается отличным от нуля).

Гашение поля p^+ осуществляется с помощью $2N$ точечных монопольных излучателей, расположенных в сечениях $x=L$ и $x=L+l$ (по N в каждом) в точках с координатами y_m $(m=1,\ldots N)$. Излучатель, помещенный в точку x_0y_0 создает поле $U\sum_{n=1}^{N} i\omega(\cos\theta_n)^{-1}\psi_n(y_0)\psi_n(y)e^{\pm ik_n(x-x_0)}$, где U — приложенное электрическое напряжение, $\cos\theta_n=k_n/k$. Тогда, если к излучателям приложить напряжения $U_{L,n}$ и $U_{L+l,n}$ $(n=1,\ldots N)$ для создания вторичного поля, равного $-p^+$ при $x>L+l$ и нулю при $x<L$, эти напряжения можно связать с амплитудами A_n^+ и координатами излучателей:

$$\tilde{p}=i\omega\sum_{n=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}(\cos\theta_n)^{-1}[U_{L,j}e^{\pm ik_n(x-L)}+U_{L+l,j}e^{\pm ik_n(x-L-l)}]\psi_n(y_j)\psi_n(y)=$$

$$=i\omega\sum_{n=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}(\cos\theta_n)^{-1}\left[\sum_{m=1}^{N}(U_me^{ik_ml}-U_me^{\mp ik_nl})\beta_{mj}\right]e^{\pm ik_n(x-L)}\psi_n(y_j)\psi_n(y)=$$

$$=i\omega\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}(\cos\theta_n)^{-1}U_m(e^{ik_ml}-e^{\mp ik_nl})\delta_{nm}\psi_n(y)e^{\pm ik_n(x-L)}=$$

$$=\begin{cases} i\omega\sum_{n=1}^{N}U_n(\cos\theta_n)^{-1}2i\sin k_nl\psi_n(y)e^{ik_n(x-L)}, & x>L+l \\ 0 & x<L, \end{cases}$$

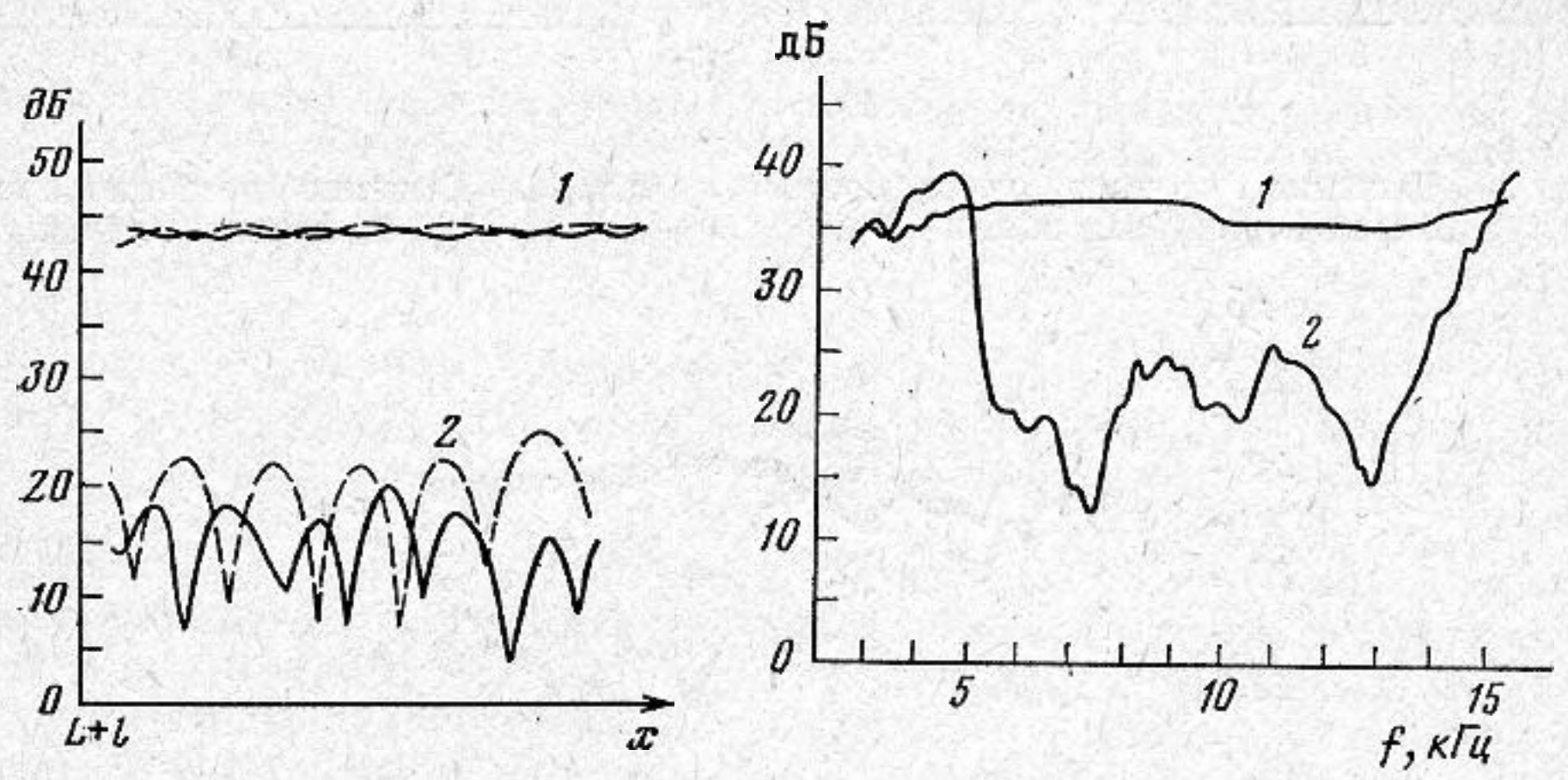
где верхний знак в экспоненте относится к полю при $x>L+l$, нижний при $x<L$, δ_{nm} — символ Кронеккера, напряжения U_m вводятся согласно формулам $U_{L+l,j}=\sum_{m=1}^{N}U_m\beta_{mj}$, $U_{L,j}=\sum_{m=1}^{N}U_m\beta_{mj}e^{ik_ml}$. В результате поле $\tilde{p}$ обладает свойством однонаправленности, а при $U_n=A_n^+\cos\theta_ne^{ik_nL}(2\omega\sin k_nl)$ будет гасить в правой части волновода поле p^+.

Приведенные формулы полностью определяют работу активной системы. От простейшей одномодовой [6] ее отличают две особенности: выделение нормальных волн при приеме и независимое управление излучением нормальных волн, а также нелинейный характер фазовых характеристик линий задержки для гашения в широком диапазоне частот. Первая особенность не приводит к существенным трудностям при реализации системы, поскольку выделение нормальных волн осуществляется путем сложения показаний приемников данного сечения с независящими от частоты коэффициентами (аналогично осуществляется и независимое управление излучением нормальных волн). Наличие же дисперсии скорости в волноводах для всех нормальных волн, кроме, может быть, нулевой, приводит к необходимости создавать достаточно сложные дисперсионные линии задержки.

Эксперимент проводился в волноводе, представляющем собой узкую щель, заполненную жидкостью ($H=0{,}125$ м, $c=1{,}5\cdot10^3$ м/с). В таком волноводе на частотах ниже 3 кГц звук не распространяется, выше 3 и 9 кГц существуют соответственно первая и вторая нормальные волны с собственными функциями поперечного сечения $\cos\pi y/2H$ и $\cos 3\pi y/2H$, а начиная с 15 кГц могут распространяться волны более высоких порядков. Звуковое поле возбуждалось источником, расположенным в левой части волновода и контролировалось парой подвижных по трассе приемников,

дававших возможность осуществлять измерение амплитуды любой из двух нормальных волн. Концы волновода были заглушены поглотителями типа [7], поэтому волновод можно было считать бесконечным.

Для работы приемной части системы существенны две характеристики: точность разделения поля на нормальные волны и точность выделения полей источников, расположенных в левой и правой частях волновода (однонаправленность). Аналогично, для излучающей части важно обеспечить однонаправленное излучение каждой нормальной волны. Достигнутая в эксперименте точность разделения на нормальные волны как по приему, так и по излучению, была не хуже – 20 дБ. Степень однонаправ-



Фиг. 1 Фиг. 2

Фиг. 1. Гашение монохроматического поля на частоте 11 кГц. Сплошная и штриховая линии – уровни давления в первой и второй нормальной волне соответственно (*1* – система выключена, *2* – включена)

Фиг. 2. Гашение стационарного поля. Первая нормальная волна

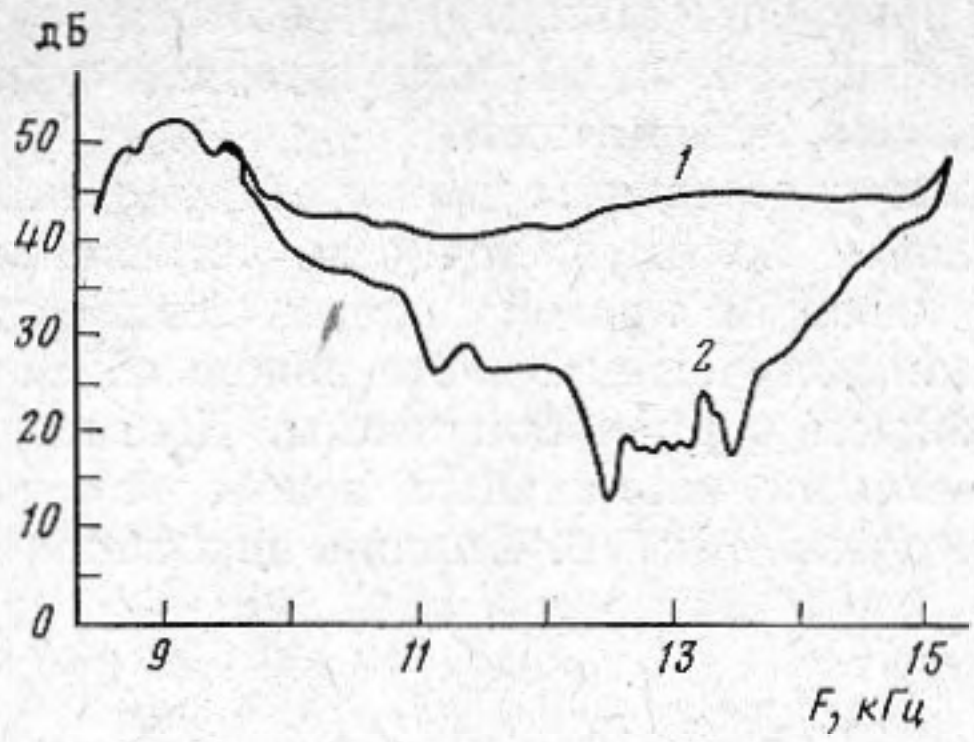
ленности приемной и излучающей части системы в диапазонах 5–8,5 кГц и 10–14,5 кГц была не ниже 15 дБ (вблизи критических частот волновода степень однонаправленности трудно контролировать).

Типичная запись поля вдоль трассы волновода при монохроматическом возбуждении с частотой 11 кГц приведена на фиг. 1 (см. также [5]). При включенной активной системе уровень поля в распространяющихся нормальных волнах снижается не менее, чем на 15 дБ. Качество гашения ограничивается, в основном, неидеальной жесткостью стенок волновода, приводящей к «просачиванию» энергии по стенкам. Неидеальность свидетельствует об ограниченной применимости двухмодовой модели к реальному волноводу и приводит к необходимости осуществлять гашение трех или большего числа волн для достижения более высокой эффективности активной системы.

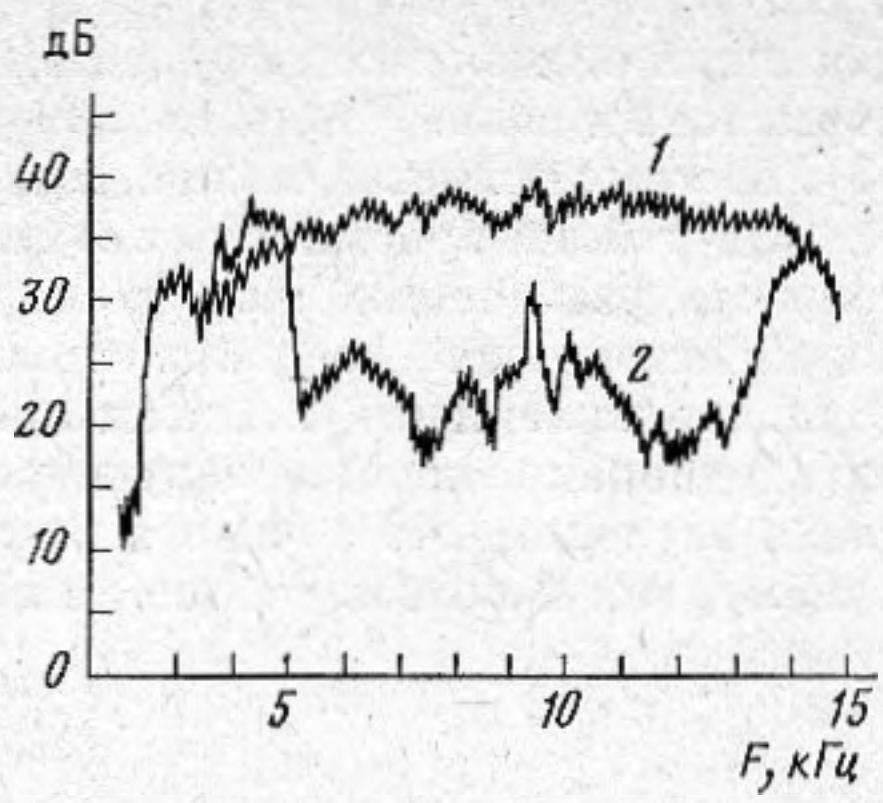
На фиг. 2 и 3 приведены результаты гашения стационарного поля в широком диапазоне частот без перестройки системы (по оси абсцисс отложена частота, по оси ординат – уровни поля в дБ). Эффективность системы составляет 12–20 дБ в диапазоне 5–8,5 и 10,5–14,5 кГц. Ограничение широкополосности вызвано трудностями аппроксимации крутых амплитудно-частотных характеристик вблизи критических частот и реализации соответствующих электронных цепей.

Физические причины этих трудностей связаны с увеличением длины нормальной волны при приближении к критической частоте и соответствующим уменьшением пространственных волновых размеров всех элементов активной системы, что приводит к снижению устойчивости системы к малым ошибкам в реализации, а также к уменьшению чувствительности однонаправленного приема и излучения.

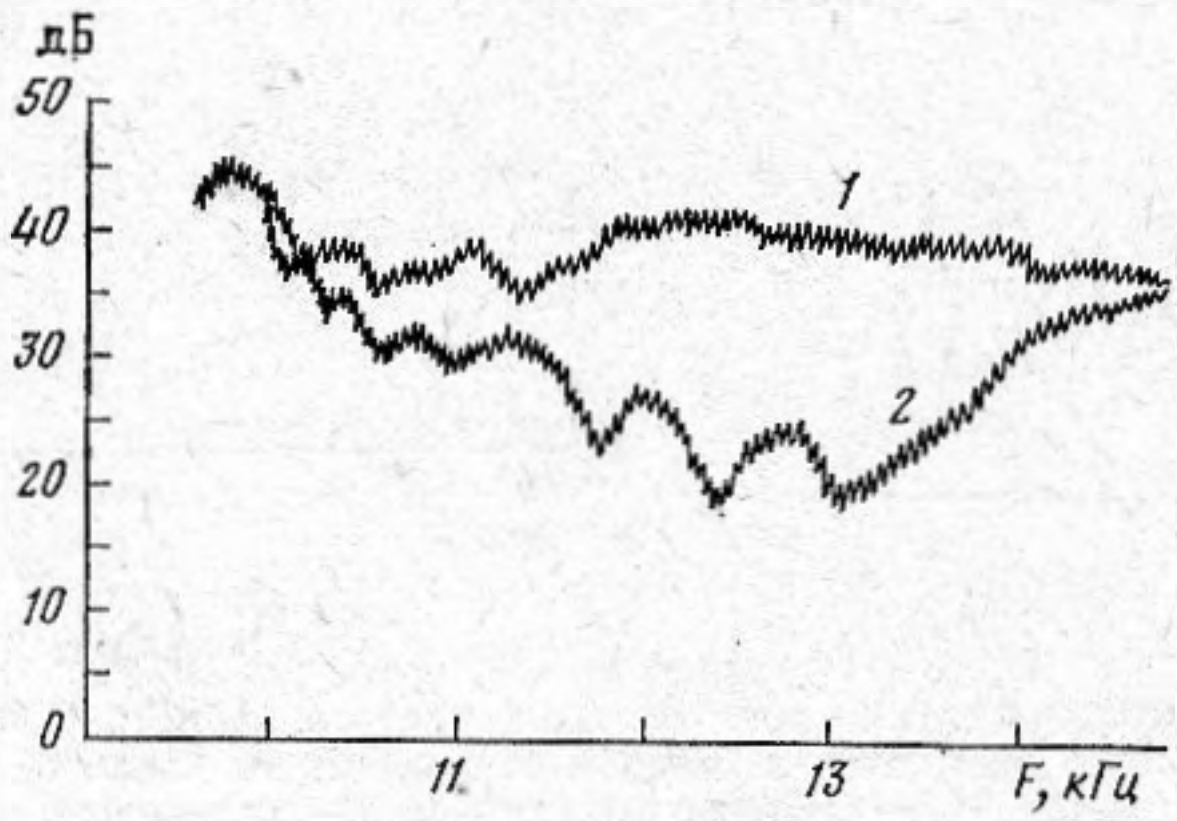
Результаты гашения нестационарных полей (возбуждаемых с помощью шумового генератора) приведены на фиг. 4 и 5. «Качество» гашения примерно такое же, как и в случае стационарного возбуждения. В этом слу-



Фиг. 3. Гашение стационарного поля. Вторая нормальная волна



Фиг. 4. Гашение нестационарного поля. Первая нормальная волна



Фиг. 5. Гашение нестационарного поля. Вторая нормальная волна

чае активная система осуществляет снижение спектральной плотности мощности шума в своем рабочем диапазоне частот, причем эффективность системы на каждой частоте приблизительно равна соответствующей эффективности для случая стационарного возбуждения поля.

Таким образом, активная система гашения звука в волноводе со сложной пространственной структурой поля может быть реализована методами, близкими к рассмотренным в работе [6]. Сложность системы определяется числом существенных с точки зрения переноса энергии нормальных волн волновода. Система может работать с достаточно высокой эффективностью в широком диапазоне частот, исключая частоты, близкие к критическим для соответствующих нормальных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федорюк М. В.* О гашении звука в волноводе активным методом.– Акуст. журн., 1975, т. 21, № 2, с. 281–285.
2. *Урусовский И. А.* Об активной звукоизоляции в волноводе.– Акуст. журн., 1977, т. 23, № 2, с. 304–312.
3. *Мазаников А. А., Уколов А. Т., Федорюк М. В.* Об активном гашении звука ограниченной частоты в волноводах.– Акуст. журн., 1977, т. 23, № 6, с. 907–912.
4. *Мазаников А. А., Тютекин В. В., Федорюк М. В.* Активное гашение звуковых полей методом пространственных гармоник.– Акуст. журн., 1980, т. 26, № 5, с. 759–763.
5. *Мазаников А. А., Тютекин В. В., Уколов А. Т.* Активная система гашения звука в многомодовом волноводе.– Акуст. журн., 1977, т. 23, № 3, с. 485–487.
6. *Мазаников А. А., Тютекин В. В.* Исследование активных автономных систем гашения акустических полей в одномодовых волноводах.– Акуст. журн., 1976, т. 22, № 5, с. 729–734.
7. *Meyer E., Tamm K.* Breitbandabsorber für Flüssigkeitsshall.– Acustica, 1952, v. 2, Beih. 2, S. 91–96.

Акустический институт им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
18.III.1983