УДК 534.222

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ В ОДНОМЕРНЫХ ЗВУКО- И ВИБРОИЗОЛЯТОРАХ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Кравчун П. Н., Прудников Е. В., Чернышев К. В.

В технике борьбы с шумом и вибрацией нередко находят применение конструкции периодического типа. К такого рода конструкциям могут быть отнесены каналы с периодически расположенными отражателями, упругие вибропроводы с промежуточными опорами, пластины с ребрами жесткости и т. д. (см., например, [1]). Указанные конструкции, представляющие собой регулярные волноводы с периодически расположенными неоднородностями, в ряде случаев могут быть представлены как одномерные периодические дискретные структуры, состоящие из четырехполюсников, соединенных отрезками одномодовых волноводов. Рассмотрение таких конструкций как дискретных структур значительно упрощает их исследование и целесообразно даже при небольшом количестве звеньев (например, 2—3 звена).

При создании звуко- и виброизолирующих систем на базе периодических конструкций существенный интерес представляет определение оптимальной длины отрезков волноводов, соединяющих четырехполюсники в структуре (под оптимальной будем понимать длину, обеспечивающую максимальное затухание волны в структуре на заданной частоте, при фиксированных параметрах четырехполюсников). При этом будем предполагать, что соединительные волноводы допускают лишь одномодовое распространение. Зная оптимальную длину соединительных волноводов, можно обеспечить на заданной частоте и в ее окрестности наилучшую звуко- или виброизоляцию при фиксированных параметрах четырехполюсников структуры.

Цель настоящей работы — определение указанной оптимальной длины, а также приложение полученных результатов к задаче заглушения шума в канале с помощью камерного звукоизолятора.

Рассмотрим дискретную структуру, представляющую собой периодическую последовательность линейных реактивных четырехполюсников, соединенных отрезками волноводов. Основные закономерности распространения волн в периодических структурах могут быть изучены, если известна характеристическая матрица $\|B\|$ элементарного звена структуры [2]. Зная характеристическую матрицу, легко вычислить, в частности, постоянную распространения Г волны в структуре:

$$\Gamma=\operatorname{arch}[0{,}5(B_{11}+B_{22})], \tag{1}$$

где B_{mn} — элементы матрицы $\|B\|$. Изучение постоянной распространения представляет особый интерес, так как позволяет определить положение полос пропускания и непропускания на оси частот, величину фазового сдвига волны при переходе через звено, коэффициент затухания волны в полосах непропускания и другие характеристики волнового процесса в структуре.

С точки зрения задачи улучшения вибро- и звукоизоляции особый интерес представляют акустические свойства структуры в полосах непропускания. Полосы непропускания определяются условием $|B_{11}+B_{22}|\geqslant 2$ [2], при этом постоянная распространения может быть представлена в виде $\Gamma=\alpha+i\beta$, где β — величина, кратная числу π (фазовый сдвиг волны), а α — коэффициент затухания, определяемый из соотношения $\alpha=\operatorname{arch}|0{,}5(B_{11}+B_{22})|$. В структурах рассматриваемого типа элементарным звеном служит совокупность четырехполюсника и отрезка соединительного волновода. Характеристическая матрица такого звена имеет вид

$$\|B\|=\begin{pmatrix} b_{11}\cos kL-ib_{12}\sin kL/Z & -ib_{11}Z\sin kL+b_{12}\cos kL \\ b_{21}\cos kL-ib_{22}\sin kL/Z & -ib_{21}Z\sin kL+b_{22}\cos kL \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где b_{mn} — элементы характеристической матрицы четырехполюсника, k — волновое число, Z — волновое сопротивление среды, i — мнимая единица, L — длина соединительного волновода.

Отметим, что величина Г не изменяется при перестановке местами четырехполюсника и отрезка волновода, так как след матрицы $\|B\|$ является инвариантом по отношению к перестановке двух линейных четырехполюсников, одним из которых в данном случае является отрезок волновода.

Используя соотношения (1) и (2), имеем

$$\operatorname{ch}\Gamma=0{,}5[(b_{11}+b_{22})\cos kL-i(b_{12}/Z+b_{21}Z)\sin kL].$$

Для получения максимального затухания волны в структуре на заданной частоте (частоте оптимизации) необходимо найти значения длины L_0 соединительных волноводов, соответствующие максимумам величины $\alpha=\operatorname{Re}\Gamma$ при фиксированных величинах b_{mn}.

Нетрудно показать, что максимумы коэффициента затухания α соответствуют экстремумам величины $\operatorname{ch}\Gamma$ и, следовательно, значения длины L_0 соединительного

волновода, при которых реализуются максимумы α, определяются соотношением

$$L_0 = -\frac{1}{k}\operatorname{arctg}\left[\frac{i\left(\frac{b_{12}}{Z}+b_{21}Z\right)}{b_{11}+b_{22}}\right]+\frac{\pi j}{k} \qquad (j=0, 1, 2, \ldots). \tag{3}$$

Из полученной формулы следует, что существует набор оптимальных длин L_0, отличающихся между собой на целое число полуволн. Однако с точки зрения конструирования звукоизолирующих систем в большинстве случаев интерес представляет лишь наименьшее из возможных значений L_0.

Таким образом, зная значения элементов характеристической матрицы четырехполюсника на заданной частоте, по формуле (3) получаем величину L_0, обеспечивающую максимальное затухание волны в структуре.

Покажем, что выбор длины соединительного волновода по формуле (3) всегда происходит так, что частота оптимизации оказывается в полосе непропускания, если четырехполюсники в структуре обладают свойством взаимности. Пусть L_0 удовлетворяет условию (3), тогда на частоте оптимизации

$$\cos kL_0 = \pm\frac{b_{11}+b_{22}}{[(b_{11}+b_{22})^2+(\tilde{n}_{12}+\tilde{n}_{21})^2]^{1/2}}; \qquad \sin kL_0 = \pm\frac{\tilde{n}_{12}+\tilde{n}_{21}}{[(b_{11}+b_{22})^2+(\tilde{n}_{12}+\tilde{n}_{21})^2]^{1/2}},$$

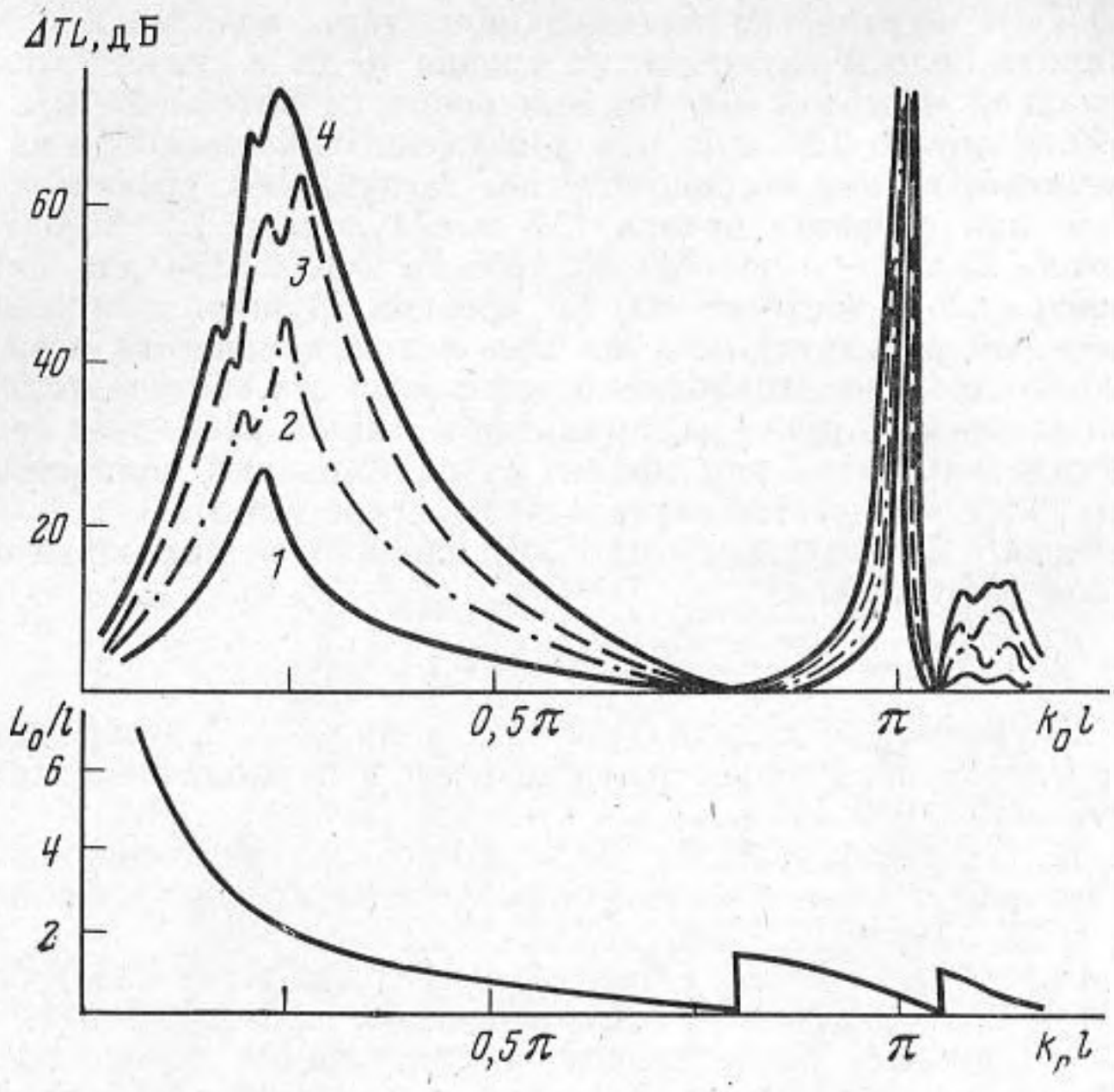
где $\tilde{n}_{21}=\operatorname{Im}[b_{21}Z]$, $\tilde{n}_{12}=\operatorname{Im}[b_{12}/Z]$ (знаки перед дробью в правых частях обеих формул должны быть одинаковы). Используя полученные соотношения, для величины $|\operatorname{ch}\Gamma|$ получаем $|\operatorname{ch}\Gamma|=0{,}5[(b_{11}+b_{22})^2+(\tilde{n}_{12}+\tilde{n}_{21})^2]^{1/2}$. Это выражение нетрудно преобразовать к виду $|\operatorname{ch}\Gamma|=0{,}5[(b_{11}-b_{22})^2+(\tilde{n}_{12}-\tilde{n}_{21})^2+4\det\|b\|]^{1/2}$. Если четырехполюсники в структуре взаимны, то $\det\|b\|=1$ [2]. Следовательно, для таких структур $|\operatorname{ch}\Gamma|\geqslant 1$, т. е. частота оптимизации находится в полосе непропускания, что и требовалось доказать.

Применим полученные результаты для решения задачи улучшения звукоизоляции многомодовых камерных глушителей в области низших частот. Глушители такого типа могут использоваться для уменьшения шума в системах вентиляции, кондиционирования, в других системах, предназначенных для транспортировки какой-либо среды по каналам. Многомодовые камеры расширения имеют ряд преимуществ перед обычно используемыми одномодовыми (см., например, [3—5]), и применение их следует считать весьма перспективным.

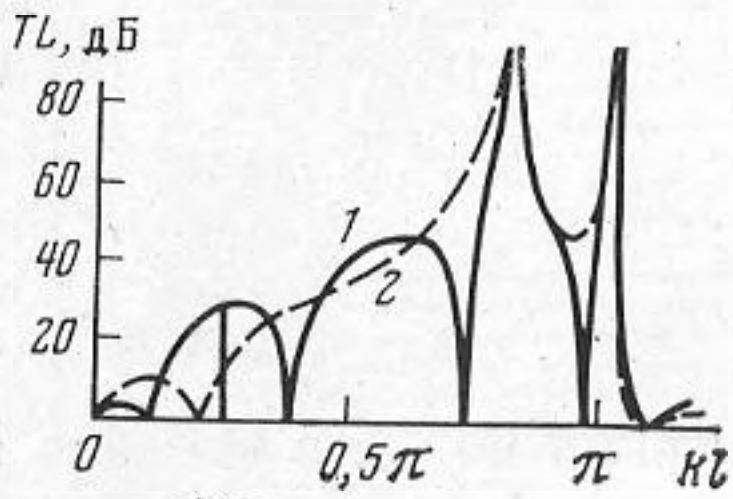
Рассмотрим цепочку из многомодовых камер расширения круглого поперечного сечения, имеющих параметры, соответствующие случаю вырождения, и коэффициент расширения $g=0{,}31$ [3]. При выбранных параметрах камер во всей рассмотренной области частот в соединительных волноводах (в данном случае — в отрезках труб) распространяющейся является лишь одна (поршневая) мода. Проведем оптимизацию длины соединительного волновода для такой цепочки предложенным в данной работе методом. Зависимость оптимального отношения L_0/l (l — длина камеры) от заданного волнового параметра k_0l, при котором производится оптимизация, представлена на фиг. 1. Там же приведена номограмма, позволяющая определить выигрыш ΔTL в уровне глушения цепочки камер на заданной частоте, получаемый при выборе оптимального отношения L_0/l, по сравнению со случаем цепочки камер без соединительных волноводов (для числа камер в цепочке $I=2, 3, 4, 5$). Из приведенных результатов следует, что наибольший выигрыш в уровне глушения наблюдается в области значений параметра $k_0l\simeq 0{,}25\pi$, т. е. в области частот, низких по сравнению с частотами продольного и поперечного резонансов камер. В этой области величина ΔTL даже для цепочки из двух камер превышает 20 дБ, в то время как сами камеры обеспечивают здесь низкий уровень глушения. Второй областью, где возможно получение значительных величин ΔTL, является окрестность резонансных частот камер ($k_0l\simeq\pi$). Однако в этом случае эффект повышения уровня глушения оказывается весьма узкополосным вследствие неравномерности поведения характеристик камер на частотах, близких к резонансным. Важно отметить, что по мере уменьшения параметра k_0l оптимальная длина соединительного волновода асимптотически приближается к четвертьволновой.

Эффективность применения соединительных волноводов оптимальной длины весьма наглядно может быть продемонстрирована на частотных характеристиках уровня глушения. На фиг. 2 представлены частотные характеристики уровня глушения цепочки из двух камер расширения с соединительным волноводом, имеющим оптимальную для $k_0l=0{,}22\pi$ длину, и без него; параметры камер те же, что и выше. Из приведенных результатов следует, что наличие волновода приводит к появлению дополнительных узкополосных провалов на частотной характеристике (анализ показывает, что указанные провалы соответствуют структурным полосам пропускания цепочки). В то же время благодаря появлению низкочастотных полос непропускания уровень глушения на низких частотах повышается. Из графиков видно, что выбор длины соединительного волновода по предложенному методу существенно повышает уровень глушения на частоте оптимизации (отмечена вертикальной чертой на фиг. 2) и в ее окрестности.

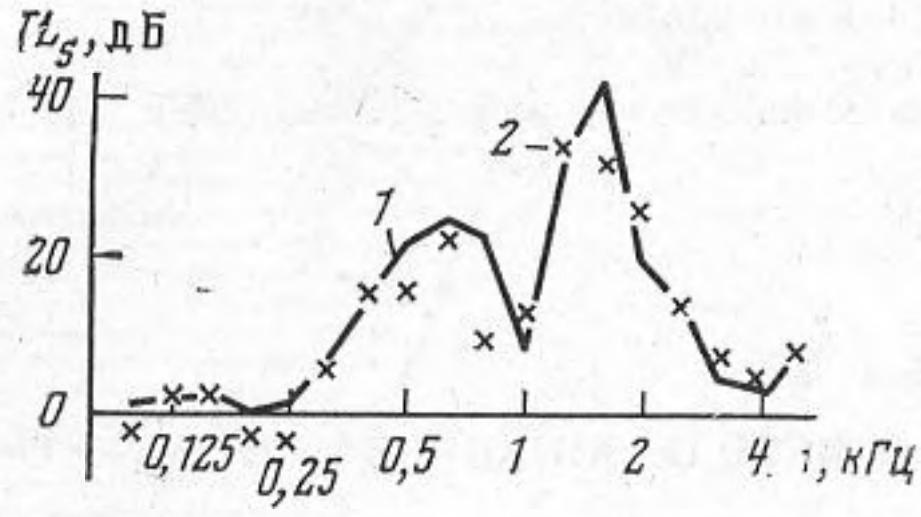
Представляет интерес оценка точности, с которой необходимо соблюдать оптимальную длину соединительного волновода, чтобы отступления от наибольшего выигрыша ΔTL на частоте оптимизации были невелики. Расчеты, проведенные для ука-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 1. Зависимость оптимальной длины соединительных волноводов (нижний график) и соответствующего выигрыша в уровне глушения для цепочек камер (верхний график) от волнового параметра оптимизации: *1* – для числа камер в цепочке $I=2$, *2* – для $I=3$, *3* – для $I=4$, *4* – для $I=5$

Фиг. 2. Частотная зависимость уровня глушения цепочки из двух камер расширения: *1* – для цепочки с соединительным волноводом, имеющим оптимальную длину для частоты, соответствующей волновому параметру $k_0 l=0{,}22\cdot\pi$; *2* – для цепочки без соединительного волновода

Фиг. 3. Уровень глушения двухкамерного глушителя с соединительным волноводом в 1/3-октавных полосах при скорости потока в системе 25 м/с: *1* – соединяет теоретически рассчитанные точки, *2* – результаты эксперимента

занной оценки, показывают, что точность соблюдения оптимальной длины должна повышаться по мере увеличения числа камер в цепочке; для случая же двух или трех камер отступления от оптимальной длины даже на величину порядка $0{,}1L_0$ не приводят к ощутимому уменьшению уровня глушения, т. е. свойства структуры таковы, что предложенный метод оптимизации длины соединительных волноводов не является слишком критичным с точки зрения точности соблюдения оптимальной длины.

С целью экспериментальной проверки полученных результатов, а также для проверки работы глушителя на основе многомодовых камер расширения в условиях, близких к условиям в реальных воздухопроводах, был разработан глушитель, состоящий из двух многомодовых камер, соединенных отрезком трубы. Требования, наложенные на характеристики глушителя, ориентировочно соответствовали условиям в системе кондиционирования воздуха в самолете. В качестве материала для глушителя был выбран алюминий толщиной 1 мм, что обеспечило малый вес глушителя и его достаточную прочность.

Испытания глушителя проводились на специальной установке для глушителей систем кондиционирования воздуха. Результаты испытаний приведены на фиг. 3, где представлены частотные характеристики (в $^1/_3$-октавных полосах) уровня ослабления шума глушителей при скорости потока в системе 25 м/с. Как на теоретических, так и на экспериментальных характеристиках отчетливо проявляется повышение уровня глушения в области частот 500–600 Гц, обусловленное соответствующим выбором длины соединительного волновода по формуле (3) (длина была оптимизирована

для частоты 550 Гц). Фактически оптимизация длины волновода в данном случае позволила расширить полосы глушения на уровне 10 дБ в сторону низких частот до полосы с центральной частотой 400 Гц при скорости потока 25 м/с и до частоты 315 Гц при скорости потока 12,5 м/с. В целом глушитель, несмотря на простоту конструкции, обеспечивает весьма широкополосное заглушение: уровень глушения более 10 дБ достигается при скорости потока 12,5 м/с в полосе 315÷2500 Гц (3 октавы), при скорости потока 25 м/с — в полосах 400÷650 Гц и 1000÷2500 Гц (лишь в $^1/_3$-октавной полосе с центральной частотой 800 Гц уровень глушения снижается до 8 дБ). Важно, что указанный результат получен при малом количестве камер в структуре (две) и всего лишь одном соединительном волноводе; это свидетельствует о том, что требование периодичности структуры, принятое в данной работе, не является на деле излишне обременительным, так как эффект от оптимизации полностью проявляется даже при минимальном количестве звеньев в структуре ($I=2$).

Авторы выражают благодарность П. Г. Даниленко за помощь в осуществлении экспериментальной части работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шендеров Е. Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 348 с.
2. *Бриллюэн Л., Пароди М.* Распространение волн в периодических структурах. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 457 с.
3. *Егорьичев А. В., Прудников А. С., Чернышев К. В.* Исследование резонансных свойств некоторых типов неоднородных акустических волноводов.— Акуст. журн., 1973, т. 19, № 3, с. 352–358.
4. *El-Sharkawy A. I., Nayfeh A. H.* Effect of an Expansion Chamber on the Propagation of Sound in Circular Ducts.— JASA, 1978, v. 63, № 3, p. 667–674.
5. *Кравчун П. Н., Чернышев К. В.* Влияние стационарного потока среды на акустические свойства многомодовых расширительных камер.— Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия, 1981, т. 22, № 5, с. 65–67.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра акустики

Поступило в редакцию
9.XII.1985

УДК 551.463.26

О МЕТОДЕ ЗОНДИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОКЕАНЕ

Краснобородько В. В., Тарасенко В. М.

Акустическая волна, распространяющаяся в океане, испытывает сильную рефракцию, что является причиной многих акустических явлений: волноводного распространения, зональной структуры, образования каустик, фокусировки и дефокусировки звука и т. д. [1]. Непосредственные экспериментальные исследования рефракции на большой водной акватории весьма трудоемки и в первую очередь из-за отсутствия оперативных методов измерения акустических полей по глубине.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что акустические поля на больших акваториях можно быстро измерять с помощью свободно падающего акустического зонда, изготовленного на базе хорошо известного теряемого температурного зонда типа XBT [2]. Для случая измерения акустического сигнала необходимо в стандартном температурном зонде вместо датчика температуры установить электроакустический преобразователь (гидрофон) со встроенным в него предварительным усилителем. При таком построении системы акустический сигнал, преобразованный в электрический, передается на борт судна по двухпроводному микрокабелю, свободно разматывающемуся с двух катушек: сбрасываемого зонда и бортового устройства, последняя из которых обеспечивает вертикальный спуск в точке измерения при движении судна. Следует отметить, что при разматывании катушек из-за их безындукционности частотный спектр принимаемого сигнала не искажается.

Возможность использования метода была проверена в бассейне глубиной 12 м Центрального морского клуба, на одной из стенок которого закреплялся ненаправленный излучатель на частоту 1 кГц.

На фиг. 1 представлена для иллюстрации обработанная на ЭВМ запись акустического сигнала, принятого свободно падающим акустическим зондом. По оси абсцисс отложена частота принимаемого сигнала в диапазоне 150—1100 Гц. Отдельные 45 реализаций представляют собой энергетические спектры принятого акустического сигнала в относительных единицах (отложенных по оси ординат) при падении зонда от водной поверхности до дна. Глубина отложена по оси апликат в метрах. Энергетические спектры рассчитывались через каждые 0,1024 с. Скорость падения зонда составляла около 3 м/с. На представленном рисунке видно, что излучатель частотой 1 кГц включили через 0,9 с после начала падения зонда.

Оценка уровня шумов по результатам исследования показала, что шумы обтекания при падении акустического зонда незначительны и уменьшаются с ростом частоты принимаемого сигнала f как f^{-3}, что хорошо согласуется с данными работы [3].