

УДК 550.34

А.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

root@sevgtu.sebastopol.ua

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Проведены испытания жидкостных глубоководных виброакустических преобразователей и их элементов в нормальных климатических условиях с использованием инерционного, гравитационного методов и метода градиента давления. Определены амплитудно-частотные и градуировочные характеристики по ускорению и давлению. Представлены результаты натурных испытаний макетов виброприемников на базе разработанных преобразователей.

На стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ проведены функциональные испытания жидкостных сейсмоакустических преобразователей (САП) и отдельных преобразующих элементов: промежуточных диффузионных преобразователей (ДП) объемной скорости рабочей жидкости (ЭПС), промежуточных ДП градиента давления и коротко- и длиннопериодных скважинных сейсмоприёмников (ПДЦ-К, ПДЦ-Д), ДП горизонтальных (ПДГС) и вертикальных (ПДВК) составляющих линейного ускорения, электрокинетических преобразователей (ЭКП) линейного ускорения и градиента давления (ВГИ).

Целью исследований является экспериментальное определение амплитудно-частотной (АЧХ) и амплитудно-градуировочной характеристик (АГХ) жидкостных САП в нормальных климатических условиях, оценка работоспособности новых конструкций сейсмоприёмников в реальных условиях эксплуатации.

АЧХ жидкостных САП определены гравитационным методом с использованием способов испытаний при одном неизменном, двух положениях САП на рабочей платформе и с компенсацией составляющих ускорения.

АЧХ ДП по давлению изображены на рисунке 1. На максимуме АЧХ, т.е. на частотах соответственно 0,05 и 0,3 Гц, определены АГХ (рисунок 2), по которым уточнены верхние пределы измерения ДП этого типа и установлена причина отклонения АГХ от линейности (из-за превышения амплитуды выходного сигнала удвоенного значения предельного диффузионного тока).

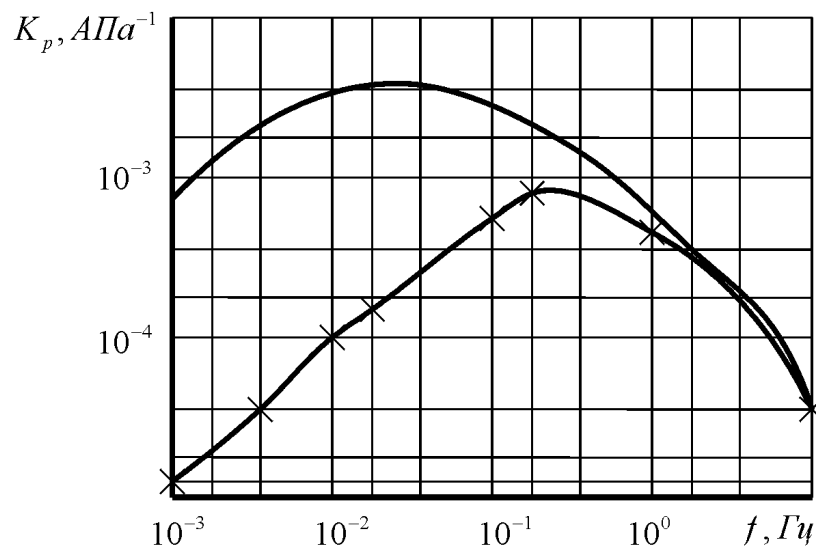


Рисунок 1 – АЧХ преобразователей ПДЦ-Д и ПДЦ-К по давлению: × – ПДЦ-К

Преобразователь типа ПДГС-I [1] выполнен в виде герметичной камеры тороидальной формы, расположенной в вертикальной плоскости, заполненной рабочей жидкостью до уровня диаметральной плоскости тора и газам и разделённой на два отсека промежуточным ДП объёмного расхода жидкости.

При испытании гравитационным методом ПДГС-I закреплён на рабочей платформе таким образом, чтобы центр масс его чувствительного элемента (ЧЭ) в обоих положениях находился выше оси колебаний.

Для снижения погрешности, обусловленной влиянием углового ускорения в направлении, перпендикулярном плоскости тора, предложено отсеки сообщать каналом с изогнутыми по радиусу тора консолями, погружёнными в жидкость, и расположенными выше и ниже диаметральной плоскости тора, при этом центр масс ЧЭ совмещён с уровнем границ раздела жидкости и газа. Для исключения попадания газа в систему электродов промежуточного ДП объём жидкости в отсеках должен превышать объём газа и обеспечивать погружение торцов консолей в жидкость при любой ориентации камеры.

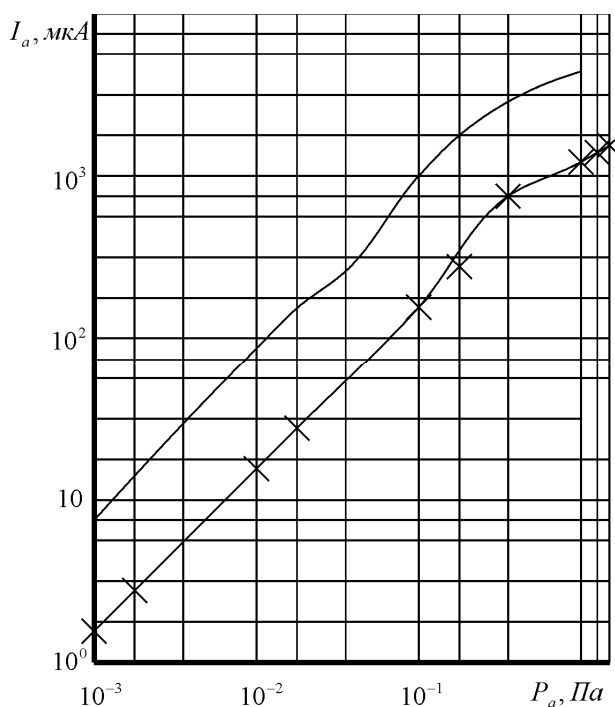


Рисунок 2 – АГХ преобразователей ПДЦ–Д на частоте 0,05 Гц и ПДЦ–К на частоте 0,3 Гц: ×– ПДЦ–К

Воздействие горизонтальной составляющей линейного ускорения a на преобразователь ПДГС–12 приводит к перепаду давления на ДП и перетоку через него жидкости, объёмный расход которой равен

$$Q = \frac{\rho l a \cos \alpha}{R_f},$$

где ρ – плотность жидкости; l – эффективная длина ЧЭ; α – угол между измерительной осью (ИО) и вектором горизонтальной составляющей линейного ускорения; R_f – гидродинамическое сопротивление ДП.

Значением нижней граничной частоты (НГЧ) f_n гидравлической системы определён нижний предел частотного диапазона измерений преобразователя на уровне 0,707

$$f_n = \frac{4\rho g}{\pi^2 R_f d^2},$$

где d – диаметр отсека на границе раздела жидкости и газа.

Верхний предел частотного диапазона определён частотными свойствами промежуточного ДП.

При воздействии углового ускорения в направлении, перпендикулярном плоскости тора, результирующий перепад давления, вызванный изменением кинетического момента инерции жидкости, компенсирован, и соответствующая составляющая выходного сигнала снижена, что повышает точность измерения линейной составляющей ускорения.

АЧХ ПДГС–12 в диапазоне частот от 0,001 до 10 Гц, приведенная к КП $K_{0,01}$ на частоте 0,01 Гц, показана на рисунке 3. АЧХ определена гравитационным методом при относительном расположении центра масс ЧЭ и оси колебания платформы установки аналогичном расположению ПДГС–I. Отсутствие режекции АЧХ в обоих положениях свидетельствует о снижении чувствительности ПДГС–12 к угловому ускорению.

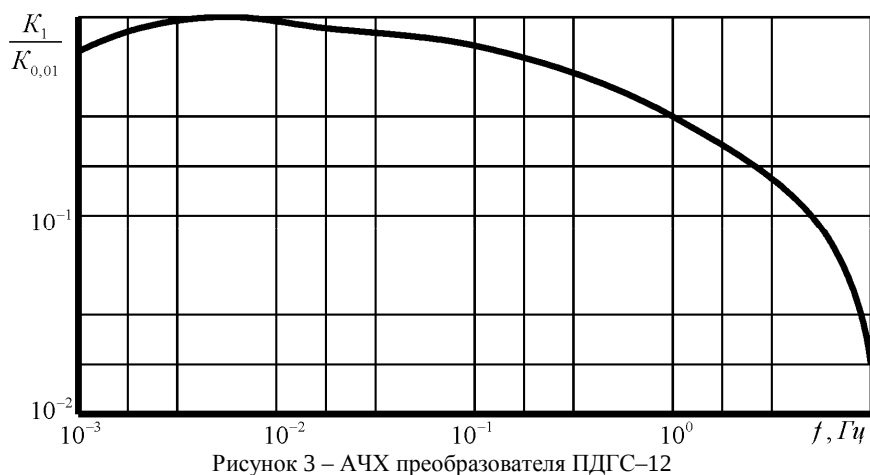


Рисунок 3 – АЧХ преобразователя ПДГС–12

Камера преобразователя выполнена из химически стойкого стекла марки ХС 3 путём пластической деформации и сварки трубок стеклотрунвым методом, установлена в металлический герметичный корпус и засыпана тальком при вибрационном воздействии. Камера выдерживает давление до 10 МПа, а установка её в корпус позволяет транспортировку в обычной таре всеми видами транспорта на любые расстояния. На базе рассмотренного преобразователя разработан макет длиннопериодного сейсмографа.

Натурные испытания макетов проведены на специальном полигоне. Сейсмографы установлены в бетонированном помещении под землёй на мысе у входа в Стрелецкую бухту в 30 м от береговой линии на высоте 2 м над уровнем моря. Выход сейсмографов соединён с измерительным магнитофоном и анализатором спектра типа 2031 фирмы «Брюль и Кьер», к которому подключён самописец уровня типа 2307 [2].

Типичный частотный спектр выходного сигнала одного из сейсмографов, полученный путём усреднения восьми реализаций, изображен на рисунке 4 (кривая 1).

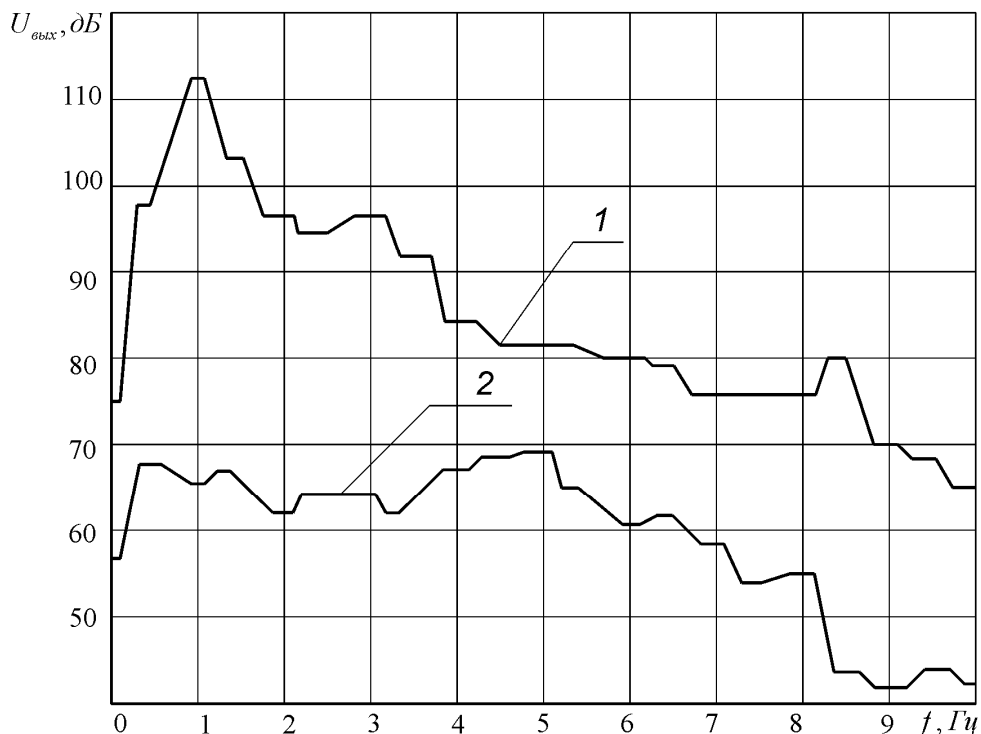


Рисунок 4 – Частотный спектр выходного сигнала сейсмографа: 1– спектр выходного сигнала; 2 – спектр шума

Кривая 2 – частотный спектр уровней шума измерительного канала в аналогичном режиме работы при замене ДП проволочным резистором с эквивалентным сопротивлением 1 кОм постоянному току. Соотношение сигнал/шум при измерении полезного сигнала не менее 15 дБ, а в диапазоне частот от 0,5 до 3,5 Гц не менее 30 дБ. При измерениях собственных шумов преобразователя ПДГС–12 совместный уровень шума не превышает уровень шума измерительного канала.

Работоспособность сейсмографов подтверждена результатами сопоставительных испытаний с интерферометрическим лазерным деформометром экспедиции Симферопольского Государственного университета. Сейсмографы установлены в бетонированной штольне бывшей 35-ой батареи на глубине 20 м и на расстоянии 300 м от береговой линии. Проведены последовательно во времени усреднения спектров выходных сигналов сейсмографов и деформометра с помощью анализатора спектра, определены уровни выходных сигналов на наиболее характерных частотах, по которым рассчитаны значения перемещений с учётом основных технических характеристик (ТХ) сейсмографов и деформометра. Типовая спектрограмма в диапазоне частот (0,004 – 0,1 Гц) показана на рисунке 5. По результатам сравнительных испытаний установлено: спектры сейсмических сигналов, измеренные с помощью преобразователей ПДГС-12 и деформометра, коррелированы между собой. Расхождения амплитуд сигналов обусловлено не векторной направленностью деформометра, отсутствием достоверной информации о скорости звука в грунте, окружающем штольню, и неодновременностью регистрации сигналов. Сигнал на частоте 0,005 Гц определён сейшем бухты, на частотах (0,18 – 0,25 Гц) – морским прибором.

Испытаниями сейсмографов на берегу и под водой выявлены информативные составляющие, характеризующие геофизические процессы, состояния поверхности морей, удалённые землетрясения и промышленные помехи, вызванные работой промышленных предприятий и движением транспорта.

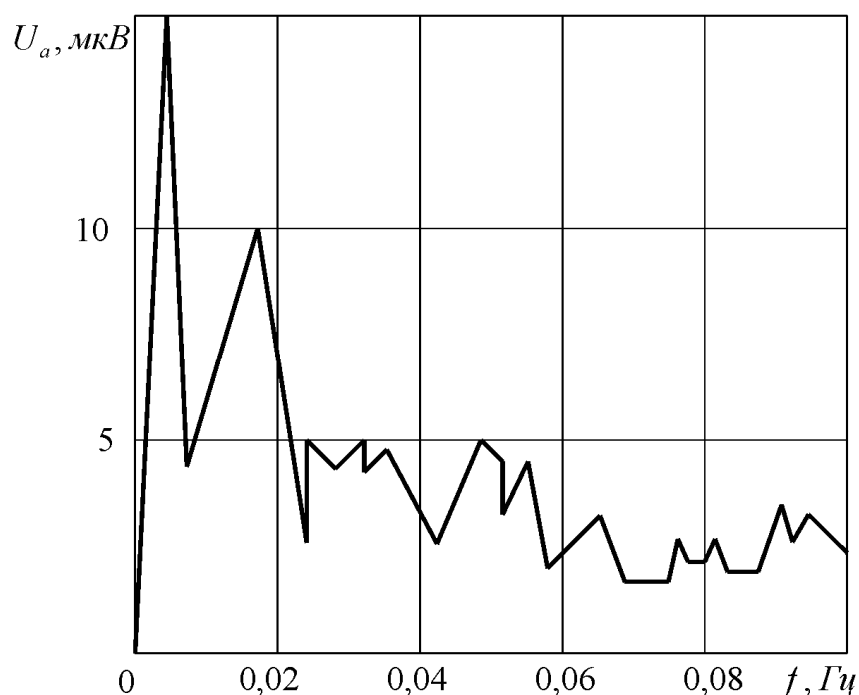


Рисунок 5 – Спектрограмма выходного сигнала сейсмографа

Преобразователь вертикальной составляющей линейного ускорения ПДВК конструктивно выполнен в виде двух коаксиальных сосудов цилиндрической формы, расположенных вертикально, заполненных рабочей жидкостью и газом и сообщающихся друг с другом по жидкости через промежуточный ДП объёмного расхода. В одном из сосудов установлен набор капиллярных трубок, обеспечивающих за счёт капиллярных сил подъём жидкости на высоту h относительно уровня жидкости в другом сосуде. Разность уровней в сосудах обеспечивает чувствительность ДП к вертикальной составляющей сейсмического сигнала. Исследовательские испытания проведены для двух модификаций преобразователя, различающихся расположением набора капиллярных трубок – во внутреннем сосуде и между внутренними и внешними сосудами.

АЧХ ПДВК определены гравитационным методом при малых ($5...10^\circ$) и больших ($50...60^\circ$) углах отклонения ИО от вертикали. Предварительно проекция ИО на рабочую платформу для каждого ПДВК совмещена с проекцией вертикали. Типовые АЧХ для каждого положения изображены на рисунке 6.

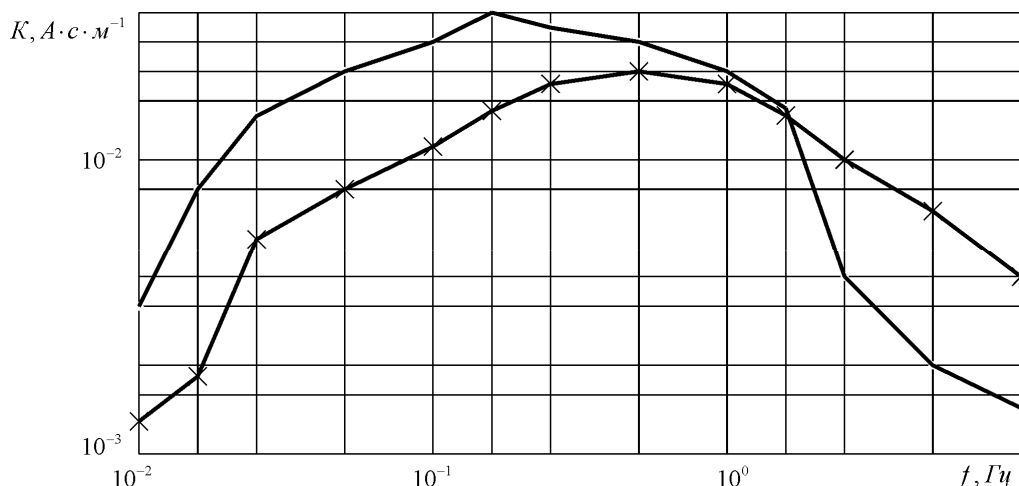


Рисунок 6 – АЧХ преобразователя ПДВК при различных углах α отклонения ИО от вертикали: $\alpha = 5^\circ$; $\times - \alpha = 60^\circ$

В результате испытаний установлено следующее:

1. Увеличение угла между направлением ИО и вертикалью приводит к смещению максимума АЧХ в сторону больших частот и уменьшения его уровня, т.е. изменению динамических свойств и коэффициента преобразования ПДВК, что обусловлено образованием под набором капилляров газового пузыря. Наличие пузыря определено визуально.

2. Отклонение действительного направления ИО от посадочного места корпуса (образующей цилиндра внешнего сосуда) для различных преобразователей составило от $0,5$ до $2,5^\circ$.

3. Использование способов реализации гравитационного метода испытаний ИП вертикальной составляющей линейного ускорения позволило определить: АГХ в диапазоне $(2 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-3})$ м/с², АЧХ в диапазоне частот $(10^{-3} \dots 10)$ Гц, действительное направление ИО и его отклонение от посадочного места; установлено наличие и условия возникновения газовых пузырей в объёме рабочей жидкости.

Для проверки наличия и объёма газовых включений в рабочей жидкости исследуемых САП их устанавливают в герметичную камеру, подключённую к датчику переменного давления (установка «Пистонфон»), задают давление по гармоническому закону на максимуме АЧХ, измеряют выходной сигнал САП, определяют КП k_p по давлению и по отношению этого коэффициента к КП $k_{\Delta p}$ по перепаду давления $\gamma_r = \frac{k_p}{k_{\Delta p}}$ судят о наличии газовых включений.

Чтобы исключить влияние силы Архимеда, обусловленной изменением плотности газа, окружающего САП, при изменении давления, ИО располагают горизонтально.

Проверку САП с герметичным корпусом проводят до его герметизации.

Для САП без явных газовых включений, заполненных в соответствии с апробированной технологией обработки рабочей жидкости и внутренней полости камер САП, отношение γ_r лежит в пределах от $0,7 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-5}$. В то же время для ряда САП это соотношение составило $2 \cdot 10^{-3} \dots 8 \cdot 10^{-3}$, что свидетельствует о значительном объёме газовых включений. После перезаполнения САП рабочей жидкостью γ_r снизилось до $2 \cdot 10^{-5}$. Наличие остаточных реакций САП на переменное давление обусловлено разным объёмом камер САП, разделённых промежуточным ДП объёмного расхода, неудалёнными остатками газовых включений в порах камер и перепадом давления за счёт различных расстояний от источника давления до центров упругих элементов САП.

Определены АЧХ исследуемых САП в диапазоне частот $(0,1 \dots 4)$ Гц гравитационным методом, в диапазоне частот $(4 \dots 500)$ Гц – инерционным на образцовом виброкалибровочном устройстве СОВКУ-68. Анализ АЧХ показал, что передаточная функция сильфонных и мембранных САП в области частот $(0,1 \dots 200)$ Гц соответствует передаточной функции инерционного дифференцирующего звена. Рассчитаны значения f_H и КП по двум значениям f_1 и f_2 частот, отличающихся не менее чем на две октавы, и значениям КП (K_1 и K_2) на этих частотах:

$$K_{\Pi} = \frac{K_1(f_1^2 + f_H^2)^{1/2}}{f_1}; \quad (1)$$

$$f_H = f_1 \times f_2 \left(\frac{K_2^2 - K_1^2}{K_1^2 \times f_2^2 - K_2^2 \times f_1^2} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Проведено сравнение основных ТХ сильфонных САП, определенных инерционным методом и по перепаду давления. При испытании по перепаду давления на корпусе САП закреплено приспособление, обеспечивающее акустическую изоляцию одного из упругих элементов от внешней среды. Приспособление подключено к датчику давления. Задано переменное давление с амплитудой 110 Па на частотах 0,4; 1; 2 и 4 Гц. Определены КП и НГЧ согласно (1) и (2). Произведен расчёт относительного отклонения НГЧ и КП по давлению инерционным методом от значений по перепаду давления.

В результате испытаний установлено следующее:

1. Гравитационный метод задания ИС позволяет определить АЧХ жидкостных САП линейного ускорения и градиента давления в диапазоне частот ($10^{-3} \dots 10$) Гц, инерционный – в диапазоне частот (10...500) Гц.

2. Для ДП различного конструктивного исполнения экспериментально установлены пределы и причины отклонений АГХ от линейности.

3. Предложена конструкция ДП горизонтальной составляющей линейного ускорения ПДГС–12 со сниженной чувствительностью к угловому ускорению. Проведены лабораторные и натуральные исследовательские испытания сейсмографа на базе ПДГС–12, позволяющие подтвердить его работоспособность, расчётные значения пределов измерения и снижение чувствительности к угловому ускорению.

4. Установленная зависимость КП ДП вертикальной составляющей линейного ускорения ПДВК от угла наклона ИО к вертикали предопределена попаданием газового объема под систему капилляров.

5. Экспериментально определено соответствие передаточной функции гидромеханической системы жидкостного САП передаточной функции дифференцирующего инерционного звена, уточнены значения НГЧ на уровне 0,707.

6. КП и НГЧ сильфонных САП, определенные инерционным методом, соответствуют значениям, определенным по перепаду давления.

Дальнейшие исследования предполагают экспериментальное определение функций влияния гидростатического давления и температуры на ТХ жидкостных САП и их элементов.

Библиографический список

1. Брунштейн Ю.Г. Жидкостный акселерометр для гидрофизических исследований / Ю.Г. Брунштейн, А.В. Троценко, Ю.А. Пороцкий // Морской гидрофизический журнал. — 1989. — № 5. — С. 63–65.

2. Фирма “Брюль и Кьер” предлагает приборы для анализа звука, вибраций и обработки данных. Каталог данных фирмы “Брюль и Кьер”. — Копенгаген, 1988/1989. — 124 с.

Поступила в редакцию 25.09.2006 г.