

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 551.466+551.466.85

**АВТОНОМНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОСТАВЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

© 2021 г. А. А. Пивоваров^{a,*}, И. О. Ярошук^{a,**}, Г. И. Долгих^a,
А. Н. Швырев^a, А. Н. Самченко^a

^a Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

*e-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

**e-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 23.10.2020 г.

После доработки 05.12.2020 г.

Принята к публикации 25.12.2020 г.

Описаны конструктивные решения и характеристики автономных акустических регистраторов, а также дано краткое описание элементов измерительного гидрофизического комплекса (излучатели, термогирлянды и др.), в составе которого они применяются. Технические возможности, заложенные в акустические регистраторы, позволяют оперативно создавать различные конфигурации дискретных антенных решеток и акустических интерферометров. На основе данных, полученных с таких приемных систем в составе гидрофизического комплекса, можно проводить диагностику водной среды, донных осадков, а также оценивать акустические характеристики различных источников звука. Предложены некоторые методы и подходы для решения подобных задач и приведены примеры.

DOI: 10.31857/S0032816221030253

ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотная акустика (частота от десятков герц до единиц килогерц) является одним из основных инструментов для решения целого ряда научных и прикладных задач океанологии, геофизики и гидроакустики. К таким задачам относятся, например, дистанционная диагностика толщи водной среды и морского дна, шумопеленгование надводных и подводных объектов и др.

Для решения таких задач исследователям нужны самые различные наборы приемных и излучающих технических устройств. Гидроакустические излучатели и дискретные приемные гидроакустические вертикальные и горизонтальные антенны являются наиболее массовым и востребованным оборудованием в этом направлении. Кроме того, для многих задач низкочастотной акустики могут потребоваться различные гидрологические приборы и устройства. Также данные о пространственно-временной изменчивости скорости звука и поверхностного волнения могут потребоваться для адекватной физической интерпретации результатов акустических экспериментов.

В данной статье рассматриваются конструктивные решения и применение автономного акустического регистратора [1] в составе акустико-океанологического комплекса, состоящего из

гидроакустических антенных решеток, низкочастотных гидроакустических излучателей (например, [2–4]) и пространственно-распределенной системы регистрации полей температуры и давления в водной среде [5]. Также кратко обсуждаются некоторые методики постановки экспериментов и приводятся примеры.

**АВТОНОМНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ
РЕГИСТРАТОР**

Для высококачественной регистрации гидроакустического поля дискретной многоэлементной антенной необходимо решить задачи синхронизации работы элементов и точного определения их положения в пространстве. Кроме того, полезно одновременно регистрировать поле температуры в непосредственной близости от элементов антенны, так как оно, как правило, с высокой точностью определяет поле скорости звука в точках расположения акустических регистраторов [6].

На рис. 1 представлена функциональная схема автономного регистратора. Автономный регистратор гидроакустических сигналов содержит микроконтроллерный блок управления, модуль энергонезависимой памяти, приемный тракт гидроакустического сигнала в составе масштабирующего усилителя с фильтром низкой частоты и



Рис. 1. Функциональная схема автономного регистратора.

32-битным сигма-дельта аналого-цифровым преобразователем (а.ц.п.), канал измерения гидростатического давления (в составе тензопреобразователя избыточного давления), цифровой датчик температуры, цифровой трехканальный акселерометр, высокоточный тактовый генератор и автономный блок питания [1].

Введение в состав автономного регистратора гидроакустических сигналов канала измерения и регистрации вариации гидростатического давления и цифрового акселерометра позволяет фиксировать параметры позиционирования для использования регистратора в составе вертикальных и горизонтальных антенн различных волновых размеров в стационарном и буксируемом вариантах. Наличие высокоточного тактового генератора позволяет синхронизировать работу автономных регистраторов при создании на их основе фазированных приемных антенн.

Возможность синхронной фиксации гидроакустических сигналов и пространственного изменения положения регистратора позволяет значительно улучшить достоверность регистрируемых акустических данных. Цифровой датчик температуры дает возможность попутно получать важную информацию о стратификации водной среды.

При применении регистратора в составе распределенной приемной антенны используется вход синхронизации для запуска процесса регистрации по единому внешнему сигналу. Генератор тактовой частоты выполнен на основе высокостабильного термостатированного кварцевого генератора, что обеспечивает долговременную синхронизацию всех элементов, составляющих распределенную приемную антенну.

Результаты измерения сохраняются на энергонезависимой карте памяти стандарта SD емкостью до 128 Гбайт, что позволяет обеспечить непрерывность записи на срок до трех месяцев. Емкость элементов питания подбирается исходя из режима и длительности работы регистратора.

Регистратор работает следующим образом. При включении питания микроконтроллерный блок управления, ядром которого является микроконтроллер PIC32MM0256GPL036, коммутирует Вх. 1–Вх. 4 приемного тракта и переходит в режим ожидания внешнего синхросигнала начала записи измерений, подаваемого на вход синхронизации (Вх. С). Тактовая частота для микроконтроллерного блока управления и а.ц.п. подается с высокостабильного термостатированного кварцевого (тактового) генератора МХО37/8Р. При поступлении на вход синхронизации микроконтроллерного блока управления внешнего сигнала запускается процесс преобразования сигналов, поступающих на его входы. На цифровой вход (Вх. 1) по SPI-протоколу поступает сигнал с пьезокерамического гидрофона, прошедший масштабирующий усилитель с фильтром низкой частоты и оцифрованный 32-битным а.ц.п. ADS 1264 с частотой дискретизации 10 кГц. Сигнал с тензометрического датчика гидростатического давления, прошедший через согласующий усилитель и оцифрованный с помощью 16-разрядного а.ц.п. с частотой дискретизации 10 Гц, поступает по SPI-протоколу на Вх. 2. На цифровой вход модуля позиционирования (Вх. 3) по протоколу I²C поступает сигнал с цифрового трехкомпонентного акселерометра GY 298 с частотой дискретизации 10 Гц. На цифровой вход (Вх. 4) по протоколу 1-wire поступает сигнал с внешнего цифрового

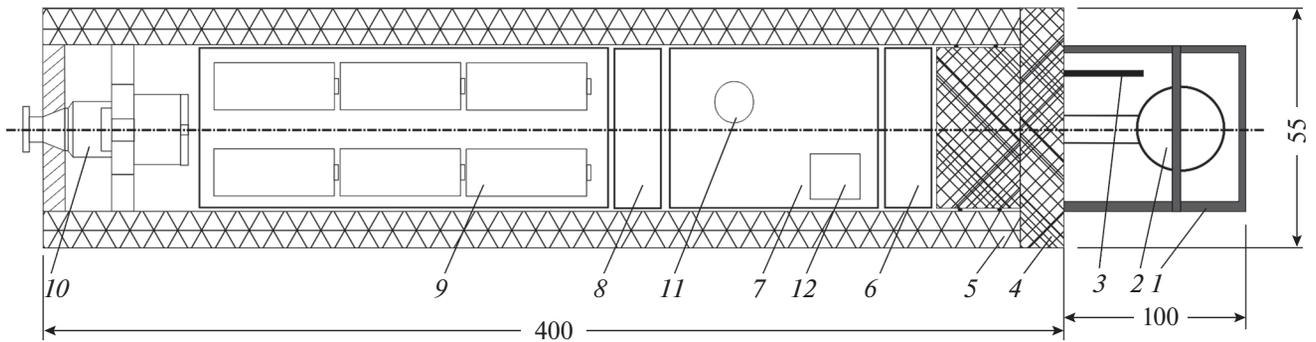


Рис. 2. Схема внутреннего устройства акустического регистратора. 1 – ограждение гидрофона; 2 – гидрофон; 3 – датчик температуры; 4 – крышка; 5 – корпус; 6 – предварительный усилитель; 7 – основная плата; 8 – блок питания; 9 – блок аккумуляторов; 10 – датчик давления; 11 – высокостабильный кварцевый генератор; 12 – карта памяти.

датчика температуры DS18B20 с частотой дискретизации 1 Гц. Данные накапливаются в буфере памяти микроконтроллерного блока управления и затем блоками записываются на энергонезависимую карту памяти типа SD емкостью до 128 Гбайт. Питание автономного регистратора осуществляется модульным блоком питания, состоящим из литий-ионных аккумуляторов. Емкость блока питания подбирается исходя из планируемой длительности и режима работы. Работа регистратора может останавливаться по сигналу, поданному на канал синхронизации, по программе микроконтроллерного блока управления при достижении некоторых параметров либо путем выключения питания. Схема внутреннего устройства акустического регистратора представлена на рис. 2.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Одной из указанных выше задач низкочастотной гидроакустики является акустическая диагностика океанических возмущений различных масштабов, например внутренних гравитационных волн [7]. Пример такого экспериментального исследования описан в [2]. Здесь широкополосный сигнал, прошедший от излучателя до вертикальной антенны, составленной из акустических регистраторов, распадается на несколько мод. Каждая мода имеет свои уникальные характеристики (например, групповую скорость), которые изменяются во времени и определяются, согласно данным мониторинга температуры [5], в основном изменчивостью поля внутренних волн. В точке приема характеристики каждой отдельной моды определяются по временной дисперсии и пространственному распределению по глубине в акустическом волноводе. Исходя из этой задачи, было выбрано расположение акустических регистраторов в качестве вертикальной антенны [8]. Данные о временной и пространственной флуктуации акустического сигнала сопоставля-

ются с характеристиками прошедших по акустической трассе внутренних волн.

В 2018–2019 гг. на шельфе Японского моря в акватории залива Посьета были проведены эксперименты по отработке методики определения пеленга и дистанции шумоподобного сигнала, а также исследование распространения низкочастотных сигналов с применением акустических регистраторов.

В эксперименте 2019 г. исследовалась задача по определению пеленга и дистанции до источника шумоподобного сигнала, принятого на горизонтальную антенну из установленных на дне в линию через 1 км синхронизированных по времени акустических регистраторов. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

В качестве источника сигнала был использован гидроакустический излучатель с электромагнитным преобразователем, предназначенный для генерации гидроакустических сигналов в диапазоне от 230 до 270 Гц и развивающий эффективное звуковое давление в полосе до 3700 Па.

В процессе эксперимента параллельно линии горизонтальной антенны с борта судна-носителя в различных точках проводилось излучение шумоподобного сигнала (M-последовательностей 256 символов) в частотном диапазоне 224–264 Гц. Уровень мощности излучения варьировался для изменения значения отношения сигнал/шум (SNR) на акустических регистраторах. На рис. 4 и 5 приведены результаты обработки сигналов с отношением сигнал/шум от нескольких децибел ($SNR \approx 2-3$ дБ) и выше.

Для каждой точки излучения строилась функция взаимной корреляции для пар 1–2, 2–3 акустических регистраторов, как показано на рис. 4. По максимуму корреляционной функции определялось время задержки прихода сигнала на соответствующие акустические регистраторы и направление на источник сигнала. Затем уже с помощью двух пеленгов от каждой пары приемников определялось расстояние до источника. Также бы-

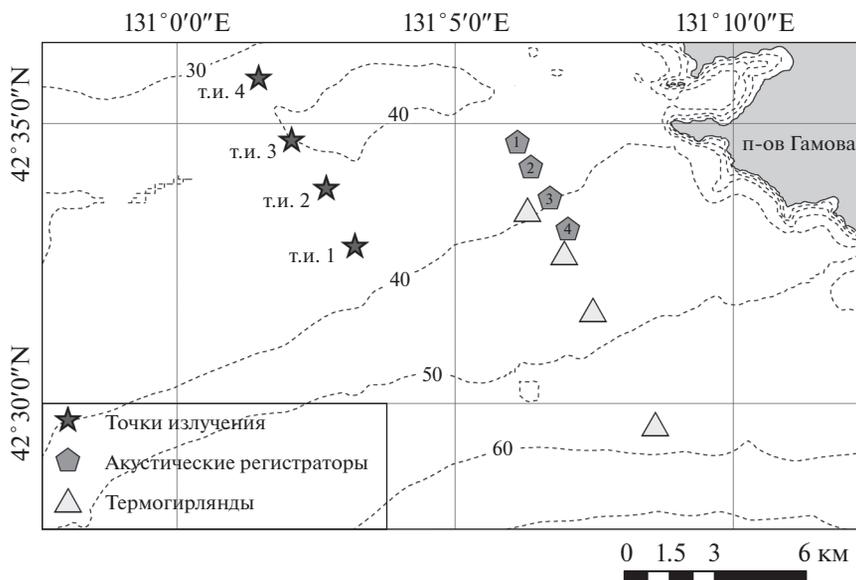


Рис. 3. Схема эксперимента 2019 г. по определению пеленга и дистанции на источник шумоподобного сигнала.

ла рассчитана зависимость ошибки оценивания пеленга по данным двух регистраторов 1 и 2 и дистанции по данным трех регистраторов 1, 2 и 3 для каждой точки излучения, как показано на рис. 5.

В октябре 2018 г., в рамках тестирования акустических регистраторов, проводился эксперимент по исследованию распространения низкочастотных акустических сигналов на стационарной трассе гидрофизического полигона. Дно данной трассы характеризуется достаточно мощным слоем осадков толщиной до 450 м [9]. При этом верхняя часть осадков общей толщиной около 100 м – это

два слоя песка разной фракции с продольными скоростями 1600 и 1650 м/с. Схема данного эксперимента представлена на рис. 6. Для излучения различных наборов шумоподобных сигналов был использован буксируемый гидроакустический излучатель с электромагнитным преобразователем, предназначенный для генерации гидроакустических сигналов в диапазоне от 30 до 40 Гц и развивающий эффективное звуковое давление в полосе до 1200 Па. Сигнал принимался на синхронизированные по времени акустические регистраторы, располо-

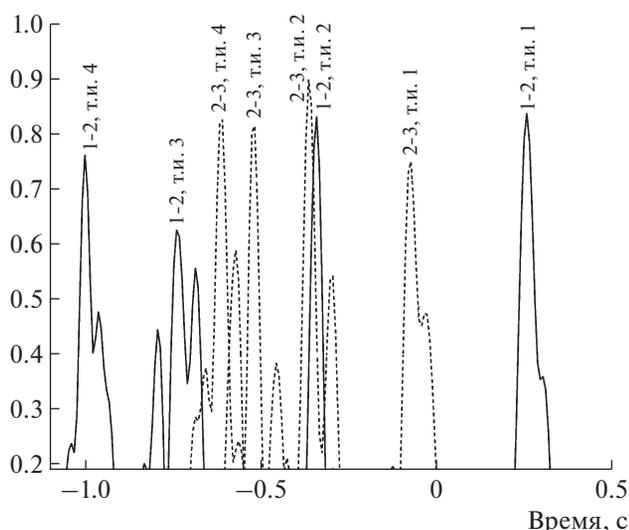


Рис. 4. Значения нормированной функции корреляции принятого сигнала для пар акустических регистраторов 1-2 и 2-3 для разных точек излучения.

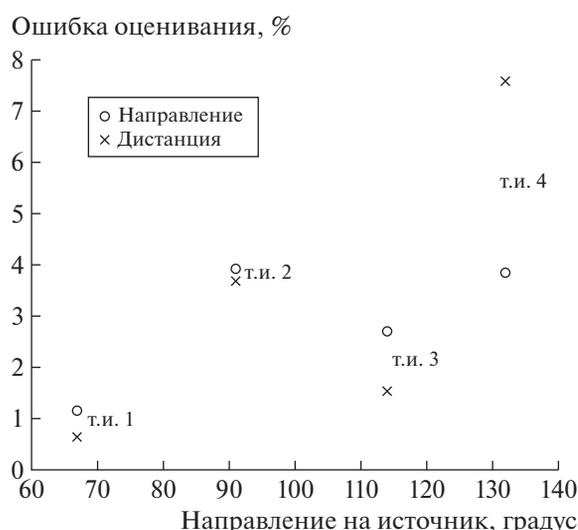


Рис. 5. Ошибка определения пеленга на источник для регистраторов 1 и 2, ошибка определения дистанции по регистраторам 1, 2 и 3 для разных точек излучения.

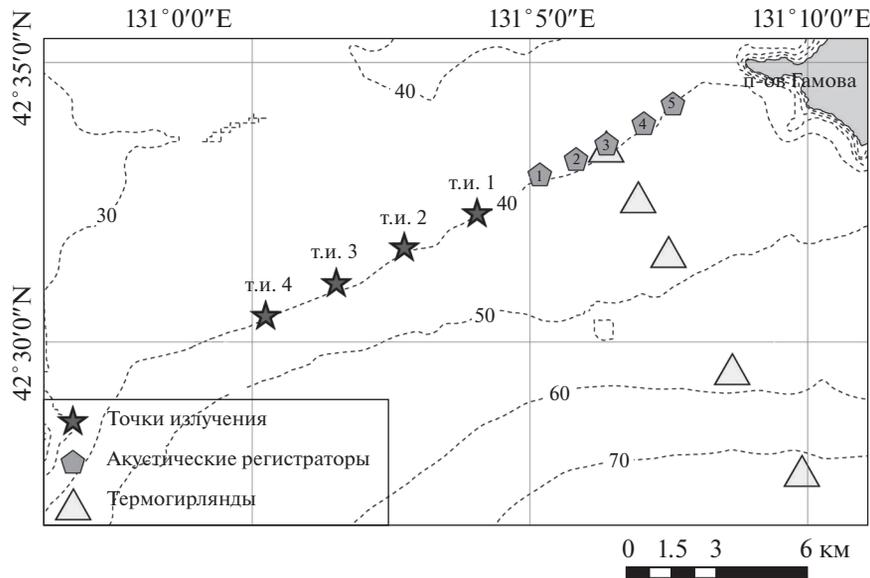


Рис. 6. Схема эксперимента 2018 г. по исследованию распространения низкочастотного звука.

женные на дне стационарной акустической трассы на расстоянии ~2 км друг относительно друга.

Хотя характерная длина волны сигналов и достаточно велика (около 45 м) для глубины акустической трассы в 40 м, тем не менее, из-за наличия мощного осадочного слоя в данном волноводе может существовать более десятка распространяющихся мод.

На рис. 7 представлены некоторые характерные результаты корреляционной обработки излученных сигналов с принятыми на акустические регистраторы 1, 3 и 5. Достоверно зная расстояние, по времени задержки сигнала определялось его скорость распространения и модовый состав. Как видно из рис. 7, на малых расстояниях (например, т.и. 1) регистрируемый сигнал формируется целым набором распространяющихся близких мод. Функция корреляции при этом довольно широкая, и групповые скорости распространения большинства мод существенно определяются свойствами осадочных слоев. На достаточно больших расстояниях от точки излучения (например, т.и. 4) большая часть мод затухает в осадках и корреляционная функция при этом становится уже, а групповая скорость приближается к скорости звука в воде. Анализ групповых скоростей различных мод, при наличии некоторой априорной информации об акустических характеристиках осадков, позволяет провести уточнения этих параметров и сформировать более детальную геоакустическую модель дна (геоакустическая инверсия) [9].

Все отмеченные выше экспериментальные исследования сопровождались регистрацией внутренних гравитационных волн, которые в данном районе являются основной причиной простран-

ственно-временных вариаций поля скорости звука во временном интервале от минут до десятка часов [10]. На рис. 3 и 6 была показана схема постановки закормленных термогирлянд, состоящих из датчиков температуры, расположенных от дна до поверхности. Все термогирлянды расположены на трассе нормально изобатам. Такое расположение было выбрано в соответствии с направлением движения интенсивных гравитационных внутренних волн в данном районе [5]. Расчеты по модели мелкой воды позволяют оценивать температуру не только в точках постановки термогирлянд, но и по всей трассе измерений [10]. Даже однократное измерение в каждом метеорологическом сезоне солености и температуры СТД-зондом на основе регрессионного анализа (температура–соленость) позволяет с достаточно высокой точностью пересчитывать полученную с помощью термогирлянд температуру в скорость звука (с точностью не хуже 0.1 м/с) [6]. Таким образом, наличие на полигоне термогирлянд позволяет эффективно оценивать поле скорости звука на акватории во время эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным преимуществом автономных акустических регистраторов является гибкость их применения, позволяющая быстро и с минимальными издержками создавать протяженные дискретные вертикальные и горизонтальные антенны различных волновых размеров. Также благодаря системе временной синхронизации возможно их использование в задачах когерентной гидроакустики и акустической томографии. Наличие датчиков гидростатического давления и температуры

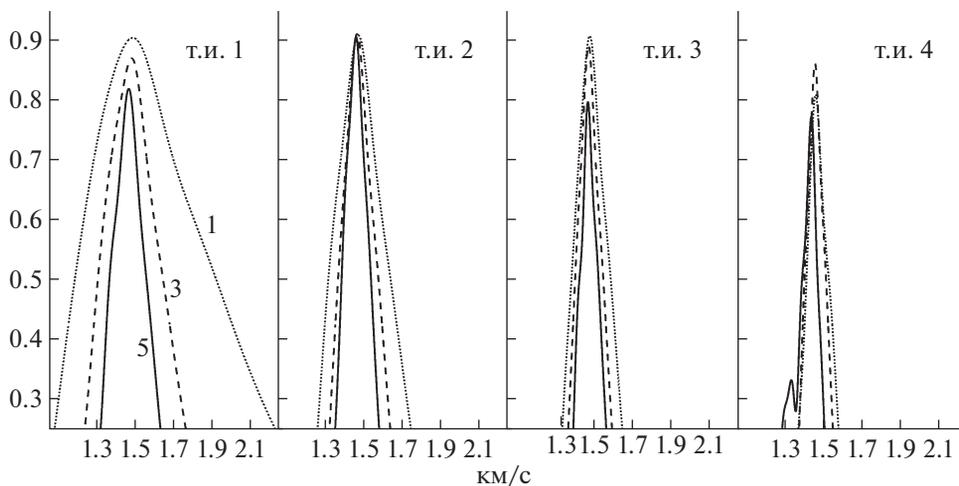


Рис. 7. Значения нормированной функции корреляции излученного и принятого сигнала на акустических регистраторах 1, 3 и 5 для различных точек излучения.

позволяет уточнять местоположение регистратора и получать информацию о поле скорости звука. На примерах в данной статье мы рассмотрели только линейные конфигурации антенн, составленные из наборов акустических регистраторов. Для некоторых задач могут потребоваться и более сложные конфигурации, например, в задачах определения пеленга [11]. При необходимости подобные антенны также могут быть сформированы на базе группы акустических регистраторов.

Комплексная регистрация акустических полей и полей температуры позволяет учитывать влияние пространственно-временной изменчивости скорости звука на формирование принятых горизонтальной антенной сигналов. Такой учет необходим как при решении прямых задач о распространении звука, так и для решения обратных задач, например задача геоакустической инверсии дна. Стоит также отметить, что с увеличением в экспериментах дистанции от источника до горизонтальной антенны, за счет накапливающихся статистических эффектов, флуктуации интенсивности сигнала на входе антенны могут достигать значительных величин (на рассмотренном полигоне до десятка децибел) [12]. Такие статистические эффекты возникают благодаря фоновым внутренним волнам, которые всегда присутствуют в морской среде. Анализ таких флуктуаций сигналов может быть произведен с помощью оценки высокочастотных колебаний температуры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по госзаданию (№ АААА-А20-120021990003-3) “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимо-

действия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Леонтьев А.П. Патент на полезную модель 171967 РФ. МПК G01V 1/38 // Оpubл. 22.06.2017. Бюл. № 18.
2. Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 95. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050341>
3. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В., Ярошук И.О. // ПТЭ. 2017. № 4. С. 137. <https://doi.org/10.7868/S0032816217030181>
4. Долгих Г.И., Ярошук И.О., Пивоваров А.А., Пенкин С.И., Швырев А.Н. // ПТЭ. 2007. № 5. С. 163.
5. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. // ПТЭ. 2017. № 1. С. 128. <https://doi.org/10.7868/S0032816216060227>
6. Kosheleva A.V., Lazaryuk A.Yu., Yaroshchuk I.O. // Proc. Meetings Acoustics. 2015. V. 24. P. 005001. <https://doi.org/10.1121/2.0000109>
7. Лучинин А.Г., Хилько А.И. // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 245.
8. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 233.
9. Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A. // Chinese Phys. Lett. 2014. V. 31. № 12. P. 124301. doi <https://doi.org/10.1088/0256-307X/31/12/124301>
10. Кукарин В.Ф., Ляпидевский В.Ю., Храпченков Ф.Ф., Ярошук И.О. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2019. № 3. С. 38.
11. Бурдуковская В.Г., Петухов Ю.В., Хилько А.И. // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 729.
12. Гулин О.Э., Ярошук И.О. // ДАН. 2014. Т. 458. № 1. С. 97.