

лентного пограничного слоя, обусловленным осреднением волновых процессов на чувствительной поверхности приемников турбулентных пульсаций давления. Было обнаружено, что увеличение частоты приводит к заметному снижению спектральных уровней пристеночных пульсаций давления. В работах [12–14] было развито представление о пространственной разрешающей способности регистрации турбулентных пульсаций давления и предложены методы восстановления по экспериментальным данным искаженных значений турбулентных спектров — спектров мощности турбулентных давлений. Для ознакомления с основными результатами в решении задачи определения искажений, вносимых приемниками пульсаций давления, можно рекомендовать монографии [15–17].

Представляет значительный интерес получить количественную информацию о влиянии на разрешающую способность регистрации пульсаций давления различных физических полей (акустических шумов, вибраций и турбулентных пульсаций температуры среды) в турбулентном пограничном слое. Влияние акустических шумов и вибраций на искажение турбулентных спектров было исследовано в работах [18–22].

Вопросы влияния турбулентных пульсаций температуры среды на регистрацию поля пристеночных турбулентных давлений наименее изучены [23], хотя исследования псевдозвуковых пульсаций давления широко распространены в среде с температурной неоднородностью. Между тем турбулентные пульсации температуры, как будет показано в настоящей статье, могут оказывать определяющее воздействие на работу приемника турбулентных давлений в температурно-стратифицированной среде.

ОТКЛИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

При регистрации турбулентных пульсаций давления в водной среде в основном используются пьезокерамические преобразователи давления. Пьезокерамика, из которой обычно изготавливают чувствительные элементы приемников пульсаций давления, обладает пьезоэлектрическим эффектом. Пьезоэлектрический эффект состоит в генерации электрических зарядов в кристалле под действием теплового инфракрасного излучения. Изменение спонтанной поляризации и появление электрического поля в пьезоэлектриках может происходить не только при изменении температуры, но и при механической деформации. В общем случае пьезоэлектричество определяется как изменение поляризации диэлектрика, обусловленное изменением его температуры [24,

25]. Изменения температуры среды приведут к появлению разности потенциалов на электродах пьезоэлемента, если пьезоэлемент успеет прогреться до температуры среды.

Физическая причина значительного влияния температурного поля на работу пьезокерамических датчиков турбулентных пульсаций давления состоит в том, что применительно к используемым в практических измерениях пьезокерамикам каждый пьезоэлектрический преобразователь давления обладает пьезоэлектрическим эффектом. В силу этого изменение температуры чувствительного пьезоэлемента приводит к генерированию дополнительного электрического сигнала на выходе преобразователя пульсаций давления. В литературе различные источники дают различающиеся значения чувствительности миниатюрных пьезоэлектрических преобразователей приемников давления к температуре. Ниже на основе представлений о пространственной фильтрации поля турбулентных пульсаций давления акустическим преобразователем конечных размеров проводится анализ влияния температурной неоднородности среды на разрешающую способность регистрации турбулентных пульсаций давления.

Рассмотрим формирование отклика приемника турбулентных пульсаций давления на воздействие турбулентных пульсаций температуры. Представим для простоты, что чувствительный элемент пьезоэлектрического преобразователя стержневого типа встроен в протяженное массивное металлическое основание. Мгновенные распределения температуры в приемнике зависят лишь от расстояния до границы с потоком и определяются температурным полем основания.

Температурные пульсации среды прогревают лишь часть чувствительного элемента датчика давления, встроенного в обтекаемое тело. Поле пульсаций температуры T вглубь датчика давления описывается одномерным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \Delta T, \quad (1)$$

где χ — коэффициент температуропроводности материала обтекаемой потоком конструкции, в которую заподлицо установлен электроакустический преобразователь.

В силу линейности задачи граничные условия достаточно рассмотреть в виде

$$T = T_0(\mathbf{k}, \omega) e^{i(\mathbf{k}y - \omega t)} y = 0, \quad T \rightarrow 0 y \rightarrow -\infty. \quad (2)$$

Здесь ось y направлена в сторону потока; векторы \mathbf{p} и \mathbf{k} расположены в плоскости $y = 0$. Величина $T_0(\mathbf{k}, \omega)$ представляет собой случайную амплитуду частотно-волновой фурье-компоненты поля пристеночных пульсаций температуры. Тогда

$T_0(\mathbf{k}, \omega, y)$ определяет распределение этой компоненты температурного поля по глубине обтекаемой конструкции. Решение уравнения (1) с учетом условия (2) записывается формулой

$$T(y, \mathbf{k}, \omega) = T_0(\mathbf{k}, \omega) e^{\sqrt{\kappa^2 - i\omega/\chi} y} e^{i(\mathbf{k}\rho - \omega t)}. \quad (3)$$

При воздействии на пьезоэлектрический чувствительный элемент температурного поля (3) в силу пирозффекта приемник формирует электрический сигнал со случайной амплитудой S_T . Определим величину амплитуды S_T “температурного” электрического сигнала, которую будем считать пропорциональной средней по длине l пьезоэлемента температуре:

$$S_{TT}(\mathbf{k}, \omega) = \gamma_{T^0} \frac{1}{l} \int_{-l}^0 T(y, \mathbf{k}, \omega) dy = \gamma_{T^0} T_0(\mathbf{k}, \omega) \frac{1 - \exp\left[-l \sqrt{\kappa^2 - \frac{i\omega}{\chi}}\right]}{\sqrt{\kappa^2 - \frac{i\omega}{\chi}}} \exp[i(\mathbf{k}\rho - \omega t)]. \quad (4)$$

Используя выражение (4), находим среднеквадратичную величину температурного сигнала, генерируемого на выходе преобразователя турбулентных пульсаций давления, порождаемого пристеночной турбулентной волной с волновым вектором \mathbf{k} , частотой ω :

$$S_T = |S_{TT}|^2 = \gamma_{T^0}^2 T_0^2(\mathbf{k}, \omega) \frac{1 - 2e^{-\alpha} \cos \beta + e^{-2\alpha}}{R}. \quad (5)$$

В выражении (5) введены следующие обозначения:

$$R = l^2 \sqrt{\kappa^4 + (\omega/\chi)^2}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{\omega}{\chi \kappa^2}\right), \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt{R} \cos(\varphi/2), \quad \beta = \sqrt{R} \sin(\varphi/2).$$

Рассмотрим полученный результат. Последний множитель в выражении для среднеквадратичного значения (5) температурного сигнала приемника пульсаций давления представляет собой температурную волновую характеристику $S_T(\mathbf{k}, \omega)$ преобразователя турбулентных пульсаций давления, равную квадрату коэффициента ослабления термосигнала при волновом представлении температурного нагружения.

Волновую характеристику $S_T(\mathbf{k}, \omega)$ в пространстве волновых векторов \mathbf{k} и временных частот ω можно рассматривать как своего рода передаточную функцию приемника, связывающую поле пристеночных пульсаций температуры, характеризующееся частотно-волновым спектром $E_{TT}(\mathbf{k}, \omega)$, и спектральную плотность температурного сигнала — частотный спектр мощности “температурного”

сигнала $\Phi_{SS}^T(\omega)$ — посредством основного соотношения волновой фильтрации:

$$\Phi_{SS}^T(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_T(\mathbf{k}, \omega) E_{TT}(\mathbf{k}, \omega) d\mathbf{k}. \quad (7)$$

Простые оценки показывают, что в полученном выражении для передаточной функции из формулы (5)

$$S_T(\mathbf{k}, \omega) = \frac{1 - 2e^{-\alpha} \cos \beta + e^{-2\alpha}}{R} \quad (8)$$

можно, как правило, пренебречь экспоненциальными членами. Тогда при $R \geq 50$ ослабление температурного сигнала определяется соотношением

$$S_T(\mathbf{k}, \omega) \approx \frac{1}{\sqrt{\kappa^4 + (\omega/\chi)^2}}. \quad (9)$$

Из последнего соотношения очевидным образом следует, что при малых пространственных масштабах и низких частотах волновых компонент поля пристеночных пульсаций температуры ослабление температурной помехи равно $(\kappa l)^{-1}$ и практически не зависит от частоты и теплопроводности конструкции, обтекаемой потоком. Значение коэффициента ослабления термосигнала и, следовательно, подавление влияния температурного поля при измерении пристеночных турбулентных давлений определяются лишь затуханием температуры по длине пьезокерамического чувствительного элемента.

В противоположном случае относительно высоких частот температурного нагружения, когда выполняется условие $\omega > \chi \kappa^2$, ослабление температурной чувствительности при измерении турбулентных давлений определяется выражением

$$S_T(\mathbf{k}, \omega) \approx \chi/\omega l^2. \quad (10)$$

Это позволяет сделать вывод, что в области высоких частот температурного нагружения доминирующим механизмом компенсации температурной помехи становится тепловая инерция корпуса преобразователя турбулентных пульсаций давления.

Представленный метод оценки влияния температурно-стратифицированной среды на регистрацию турбулентных пульсаций давления проиллюстрируем расчетом семейства волновых характеристик подавления температурной помехи на примере миниатюрного приемника турбулентных давлений, установленного в стальном корпусе.

На рис. 1 и 2 показаны расчетные зависимости температурной чувствительности приемника пульсаций давления $S_T(\mathbf{k}, \omega)$ от длины волны на частотах 1, 10, 10^2 , 10^3 и 10^4 Гц. При измерении пристеночных пульсаций давления здесь использована модель приемника пульсаций давления с длиной рабочего чувствительного пьезоэлемента

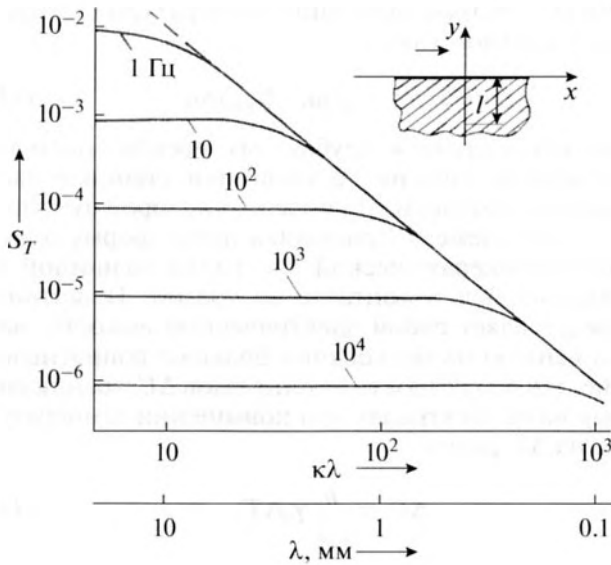


Рис. 1. Определение влияния пульсаций температуры на частотах 1, 10, 10², 10³ и 10⁴ Гц.

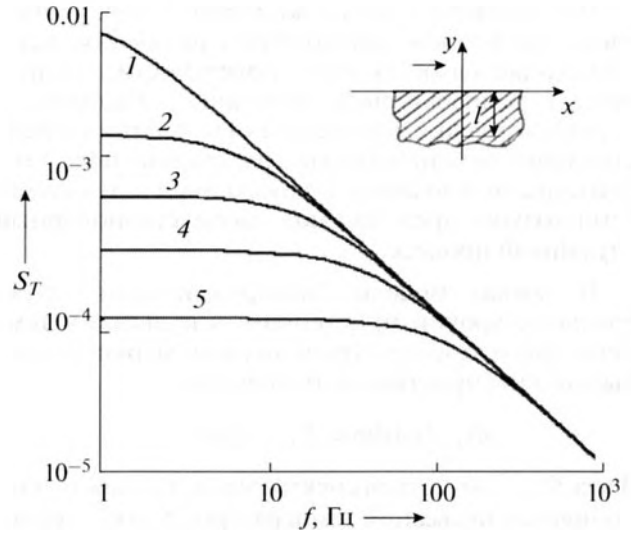


Рис. 2. Частотные характеристики температурной чувствительности приемника в зависимости от пространственного масштаба температурной неоднородности. Значения $k\lambda$: 1 – 10, 2 – 25, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 100. Соответствующие значения длины волны λ , мм: 9.4, 3.8, 2.4, 1.6, 0.9.

15 мм, установленного в стальном корпусе заподлицо с обтекаемой поверхностью.

Из рассмотрения семейства кривых температурной чувствительности приемника пульсаций давления на рис. 1 и 2 можно сделать вывод, что в широком частотно-волновом диапазоне флуктуаций температуры чувствительность пьезоэлектрического приемника турбулентных пульсаций давления к температуре изменяется на несколько порядков. При этом оценки, выполненные по представленным на рис. 1 и 2 волновым характеристикам, показывают, что влияние температурно-стратифицированной среды на экспериментальные исследования турбулентных полей давлений в области низких и средних частот спектра может оказаться значительным.

РЕГИСТРАЦИЯ ШУМОВ ОБТЕКАНИЯ В ТЕМПЕРАТУРНО-СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ

При исследовании морского дна и процессов раздвижения плит литосферы на дне морей и океанов; в приложениях при проведении геолого-геофизического обследования дна моря акустические преобразователи-приемники давления работают в турбулентной среде, в условиях стратифицированных течений, при воздействии движущихся неоднородностей температурно-стратифицированной среды. Можно указать многочисленные примеры: эхолоты, гидрофизическая аппаратура, приборы многоканального глубинного сейсмопрофилирования, самоходные подводные аппараты

и буксируемые необитаемые подводные аппараты, буксируемые антенны.

В этом разделе мы рассмотрим влияние температурных неоднородностей среды на конкретном примере исследования шумов обтекания, создаваемых турбулентными пульсациями давления в пограничном слое на теле всплывающего устройства. На всплывающем устройстве отсутствуют посторонние шумы, мешающие измерениям турбулентных шумов обтекания и их источников, поскольку движение создается потенциальным полем гидростатического давления. Подобный тип экспериментальных установок для исследования псевдозвука был предложен впервые Скучиком и Хэддлом [26] и получил с тех пор широкое распространение при экспериментальных исследованиях физики акустико-гидродинамических явлений [27, 28]. Всплывающее устройство обеспечивает получение информации о спектральных характеристиках турбулентных пульсаций давления, возникающих при турбулентном обтекании. Всплывающее устройство, созданное в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, представляет собой автономную морскую лабораторию, позволяющую проводить эксперимент в глубоком море на скоростях всплытия 8–22 м/с. Всплывающее устройство обеспечивает проведение экспериментальных исследований шумов обтекания при очень высоких (более 10⁸) числах Рейнольдса обтекающего потока, что недостижимо в лабораторных условиях.

При движении тела в жидкости с переменной вдоль траектории температурой приемник, установленный на обтекаемой поверхности, воспринимает температурные пульсации. Рассмотрим случай, когда при вертикальном всплытии устройства одновременно (вдоль траектории) поле температуры можно считать однородным и пульсации температуры представляют собой стационарный случайный процесс.

В рамках модели “замороженности” спектральные уровни пристеночных пульсаций температуры и температурная неравномерность среды связаны простым соотношением

$$\Phi_{TT}(\omega) d\omega = E_{TT}(\kappa) d\kappa. \quad (11)$$

Здесь Φ_{TT} – частотная спектральная плотность пристеночных пульсаций температуры, $E_{TT}(\kappa)$ – одномерный (вдоль направления движения) пространственный спектр температурной неравномерности среды. Угловая частота ω однозначно связана с волновым числом κ соотношением $\kappa = \omega/v$, где v – скорость движения жидкости относительно приемника турбулентных пульсаций давления.

Модель “замороженности” турбулентных пульсаций позволяет пересчитывать временные (частотные) спектры в пространственные одномерные спектры. Очевидным образом из соотношения (11) следует связь между спектральной плотностью пристеночных пульсаций температуры и спектром градиентов температуры вдоль траектории. Используя для спектра производной известную формулу $E'_{TT}(\kappa) = \kappa^2 E_{TT}$, окончательно получаем

$$\Phi_{TT}(\omega) = \frac{v}{\omega^2} E'_{TT}(\kappa). \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет определить спектральные уровни пульсаций температуры на обтекаемой поверхности, т.к. по вертикальным градиентам температуры в океане в научных рейсах и морских экспедициях получены обширные экспериментальные данные [29]. В этой монографии А.С. Моница и Р.В. Озмидова подытожены данные о мелкомасштабной турбулентности океана, представлены сведения о статистических параметрах турбулентных флюктуаций и их зависимости от фоновых гидрологических условий, дан анализ скорости и диссипации турбулентной энергии, приведены характеристики перемежаемости турбулентных полей в океане.

При определении спектральных уровней пульсаций температуры на обтекаемой поверхности будем учитывать, что “эффективный” спектр $\Phi_{TT}^{\text{эф}}(\omega)$ пульсаций температуры для реальных размеров приемника пульсаций давления и не слишком низких частот ($f \geq 0.1$ Гц) связан в силу

(10) со спектром пульсаций температуры (12) простым соотношением

$$\Phi_{TT}^{\text{эф}}(\omega) = \chi/\omega l^2 \Phi_{TT}(\omega). \quad (13)$$

Применительно к трубчатому преобразователю пульсаций давления с толщиной стенки h рассмотрим упрощенную модель, в которой чувствительный элемент приемника имеет форму плоской пьезокерамической пластинки толщиной h , находящейся в контакте со средой. Пластика представляет собой электрическую емкость, нагруженную на бесконечно большое сопротивление, так что разность потенциалов ΔU , возникающая на ее электродах при повышении температуры на ΔT , равна

$$\Delta U = \frac{h}{\epsilon_0 \epsilon} \gamma_0 \Delta T, \quad (14)$$

где $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \times 10^7$ м/Гн – электрическая постоянная; ϵ , γ_0 – соответственно диэлектрическая проницаемость и пьезоэлектрическая постоянная пьезокерамики. Согласно (14), при типовых значениях $\epsilon = 1200$ и $\gamma_0 = 2 \times 10^{-4}$ Кл/м² К нагревание пьезокерамической пластинки толщиной $h = 0.001$ м на 1 К формирует разность потенциалов около 20 В [24].

Спектр температурного сигнала, генерируемого приемником пульсаций давления при воздействии на чувствительный элемент пульсаций температуры, определяется выражением

$$\Phi_{SS}^T(\omega) = (v)^2 \Phi_{TT}^{\text{эф}}(\omega). \quad (15)$$

Тогда с учетом (12) и (13) получаем соотношение

$$\frac{\Phi_{SS}^T(\omega)}{\Phi_{SS}^p(\omega)} = \left(\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon}\right)^2 \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_p}\right)^2 \left(\frac{h}{l}\right)^2 \frac{v \chi E'_{TT}(\frac{\omega}{v})}{\omega^3 \Phi_{pp}(\omega)}, \quad (16)$$

определяющее относительный вклад температурной неоднородности среды в шумы обтекания, регистрируемые приемником турбулентных пульсаций давления, установленном на всплывающем устройстве. В последнем равенстве $\Phi_{pp}(\omega)$ – спектральная плотность пристеночных пульсаций давления, γ_p – чувствительность приемника к давлению.

Полученные результаты, с учетом данных монографии [29] по вертикальным градиентам температуры в океане, приводят к выводу, что в условиях экспериментов [26] на всплывающих устройствах в области частот до 100 Гц и скорости всплытия $v \sim 10$ м/с вклад пульсаций температуры в генерируемые приемником сигналы обтекания может быть практически равен вкладу турбулентных пульсаций давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современной гидроаэродинамической акустике важное место продолжают занимать исследования пристеночных турбулентных пульсаций давления. Предложенные методы и полученные в работе результаты позволяют оценить перспективность продолжения изучения пространственной разрешающей способности приемников пульсаций давления, начатые в [12–14] в направлении исследования влияния различных физических полей (акустических шумов, вибраций и турбулентных пульсаций температуры) в турбулентном пограничном слое на искажение спектральных уровней турбулентных давлений.

В работе исследовано формирование отклика пьезокерамических приемников пульсаций давления при воздействии на чувствительный элемент приемника пульсаций температуры рабочей среды. Выполнено расчетное исследование ослабления температурного сигнала приемника давления в турбулентном пограничном слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. 206 с.
2. *Мушин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А.* Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
3. *Власов Е.В., Гиневский А.С., Ефимцов Б.М., Кузнецов В.М., Мушин А.Г., Самохин В.Ф., Смольяков А.В., Соболев А.Ф.* Основные проблемы аэроакустики. Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. Выпуск 2614. М.: ЦАГИ, 1996. 56 с.
4. *Ефимцов Б.М.* Характеристики поля пристеночных турбулентных пульсаций давления при больших числах Рейнольдса // *Акуст. журн.* 1982. Т. 28. № 4. С. 491–497.
5. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 1, 2. М.: Наука. Физматгиз, 1965, 1967.
6. *Monin A.S., Yaglom A.M.* Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence, Dover Publications, 2007.
7. *Lighthill M.J.* Sound generated aerodynamically // *Proc. Roy. Soc. A* 1962. V. 267. Issue 1329.
8. *Blake W.K.* Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration // Academic Press. New York, 1986. V. II. 567 p.
9. *Willmarth W.W.* Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Annual Review of Fluid Mechanics*. New York, 1975. V. 7. P. 13–38.
10. *Willmarth W.W.* Structure of turbulence in boundary layers // *Advances in Applied Mechanics*. Academic Press. N.Y., 1975. V. 5. P. 159–254.
11. *Eckelman H.A.* Review of knowledge of pressure fluctuations. // *Near Wall Turbulence: Proceedings of the 1988 Zoran Zaric Memorial Conference*. P. 328–347.
12. *Corcos G.M.* Resolution of pressure in Turbulence // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1963. V. 35. № 2. P. 192–199.
13. *Кудашев Е.Б.* Избирательность акустического приемника в турбулентном потоке // *Инженерно-физич. журн.* 1969. Т. 17. № 3. С. 416–422.
14. *Кудашев Е.Б., Попов А.И.* Разрешающая способность приемников турбулентных пульсаций скорости и давления в турбулентном потоке // *Метрология*. 1971. № 7. С. 51–57.
15. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пристеночные пульсации давления. М.: Научный мир, 2007.
16. *Смольяков А.В., Ткаченко В.М.* Измерение турбулентных пульсаций. Л.: Энергия, 1980. 264 с.
17. *Смольяков А.В.* Шум турбулентных потоков: Монография. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 312 с.
18. *Kudashev E.B.* Methods of near-wall-pressure fluctuations measurements in the presence of vibration // *J. Fluids and Structures*. 2004. V. 19(8). 1129–1140.
19. *Кудашев Е.Б.* Регистрация пристеночных пульсаций давления при воздействии вибраций, возбуждаемых турбулентным потоком // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 2. С. 215–223.
20. *Кудашев Е.Б.* Подавление акустических шумов, действующих в экспериментальной установке при измерении пристеночных пульсаций давления // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 5. С. 644–655.
21. *Кудашев Е.Б., Веребьевский И.Д.* Измерение турбулентных пульсаций давления на фоне акустических помех // *Труды метрологич. институтов СССР. Исследования в области гидродинамических измерений*. 1975. Вып. 157 (217). С. 107–111. М.: Изд.-во станл.: М., 1975.
22. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. и др.* Автор. свид. № 800746 ГосКом изобрет. СССР на изобретение “Способ определения турбулентных пульсаций давления на фоне вибрационной помехи // *Бюлл. изобретений*. 1981. № 4.
23. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Влияние температурной неоднородности среды на регистрируемые пьезоприемником шумы обтекания // *Акуст. журн.* 1986. Т. 32. № 1. С. 127–128.
24. *Бугуславская С.Н., Романенко Е.В., Холод Л.И.* Использование пьезоэлектрического эффекта в акустических измерениях // *Акуст. журн.* 1971. Т. 17. № 2. С. 210–216.
25. *Паньков А.А.* Пьезоэлектрические свойства пористого титаната бария // *Журн. радиоэлектроники*. 2014. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov14/index.html>
26. *Huddle G., Skudrzyk E.* The Physics of Flow Noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46. P. 130–157.
27. *Кудашев Е.Б.* Экспериментальные исследования шумов обтекания на всплывающем устройстве // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 4. С. 488–499.
28. *Кудашев Е.Б., Кольшиницын В.А., Маршов В.П., Ткаченко В.М., Цветков А.М.* Экспериментальное моделирование гидродинамических шумов обтекания на Автономной морской лаборатории // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 2. С. 211–221
29. *Монин А.С., Озмидов Р.В.* Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат 1981. 320 с.
30. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, Физматлит, 1973. 848 с.