

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ
ДАВЛЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНЫХ
ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В
ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ
СЛОЕ**

Е.Б. Кудашев, Л.Р Яблоник

Экспериментальные исследования турбулентных пристеночных давлений инициированы как задачами моделирования турбулентных процессов и параметров пристеночной турбулентности, так и прикладными задачами аэрогидродинамической генерации шумов и вибраций. Одной из задач моделирования остается преодоление искажений результатов экспериментальных исследований, вызванных акустическим шумом внешних источников. Поле турбулентных давлений на поверхности обтекания включает в себя длинноволновую компоненту, формируемую акустическим полем в зоне течения.

В лабораторных исследованиях акустический шум связан с работой оборудования. В водной среде задача подавления акустических шумов была решена после создания всплывающего устройства. Всплывающее устройство представляет собой удлиненное тело вращения (диаметр 650 мм, длина от 6 до 14 м), имеет в погруженном состоянии избыточную архимедову плавучесть и способно самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории [1].



Турбулентные пульсации давления на поверхности всплывающего устройства во время его движения, регистрируют приемники, встроенные в обтекаемое тело



Измерения пристеночных турбулентных давлений выполняются в различных точках измерительной секции двумя типами пьезокерамических преобразователей давления: 1) стержневые (трубчатые) датчики глубиной около 15 мм и приемной поверхностью диаметром 1.3 мм и 2) пластинчатые датчики толщиной около 1 мм с диаметром приемной поверхности 20 мм.

Приемник, непосредственно контактирующий с обтекающей средой, характеризуемой граничным температурным полем $T(\mathbf{k}, \omega)$, формирует в силу пирозффекта электрический сигнал. Среднеквадратичное значение сигнала для датчика пульсаций давления, встроенного в обтекаемое тело, в рамках модели, развитой в [2], определено в форме(1):

$$\overline{|e_T^2(\kappa, \omega)|} = \gamma_T^2 \frac{1 - 2e^{-\alpha} \cos \beta + e^{-2\alpha}}{R} \overline{|T_0^2(\kappa, \omega)|}, \quad (1)$$

в котором

$$\begin{aligned} R &= h^2 \sqrt{\kappa^4 + (\omega/\chi)^2}; & \varphi &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\omega}{\chi \kappa^2} \right); \\ \alpha &= \sqrt{R} \cdot \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right); & \beta &= \sqrt{R} \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

параметры χ и h представляют собой соответственно температуропроводность и протяженность приемника в направлении нормали к стенке.

Применительно к воздействию случайного однородного стационарного температурного поля соотношение (1) представляется в виде

$$\Phi_{SS}^T(\omega) = \gamma_T^2 \int_{\infty} S_T(\kappa, \omega) E_{TT}(\kappa, \omega) d\kappa. \quad (3)$$

где - $\Phi_{SS}^T(\omega)$ частотный спектр температурного сигнала, $E_{TT}(\kappa, \omega)$ – частотно-волновой спектр пристеночных пульсаций температуры; $S_T(\kappa, \omega)$ - волновая температурная характеристика приемника, определяемая, ввиду (1), равенством

$$S_T(\kappa, \omega) = \frac{1 - 2e^{-\alpha} \cos\beta + e^{-2\alpha}}{R}. \quad (4)$$

Турбулентные возмущения будем считать при вертикальном всплытии замороженными, т.е не меняющимися во времени. В рамках модели «замороженности» спектральный частотно-волновой спектр и температурная неравномерность среды связаны простым соотношением

$$E_{TT}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{1}{U} P_{TT}(\kappa) \delta(\kappa - \omega/U) \quad (5)$$

где $P_{TT}(\kappa)$ - спектр вертикальной температурной неоднородности в зоне всплывающего устройства.

Соответственно выражение (3) для частотного спектра температурного сигнала приобретает вид:

$$\Phi_{SS}^T(\omega) = \gamma_T^2 \frac{1}{U} S_T(\omega/U, \omega) P_{TT}(\omega/U) \quad (6)$$

Расчеты показывают, что при умеренных скоростях обтекания, превышающих 1-2 м/с, частотная зависимость температурной характеристики S_T определяется лишь характерной «тепловой» частотой

$$\Omega_\chi = \frac{\chi}{h^2}. \quad (7)$$

При этом волновая характеристика практически перестает зависеть от скорости, так что

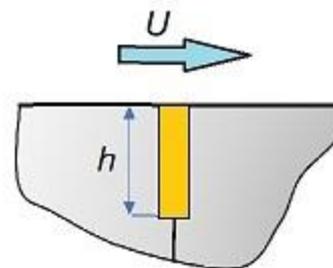
$$S_T \approx \frac{\Omega_{\chi}}{\omega}. \quad (8)$$

Параметр Ω_{χ} практически определяется лишь геометрией используемого преобразователя, его величина может изменяться в довольно широких пределах.

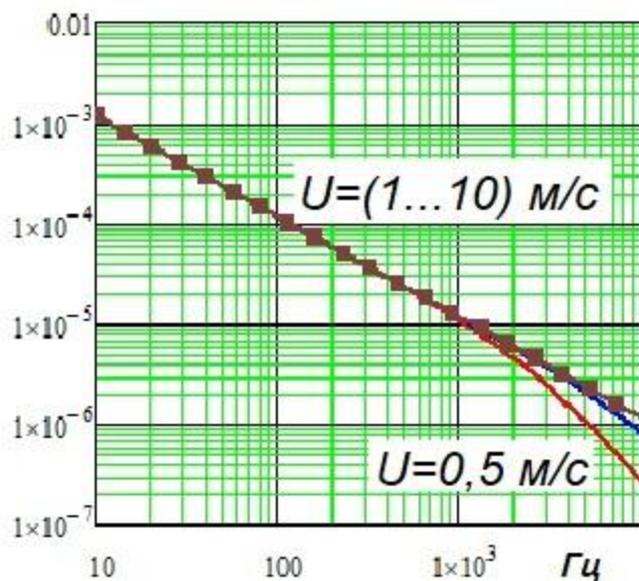
В частности, в экспериментах [4] использовались два типа приемников, значения Ω_{χ} для которых оцениваются значениями $0,073 \text{ с}^{-1}$ и $0,55 \text{ с}^{-1}$.

1. Температурная передаточная характеристика $S_T(\omega/U, \omega)$

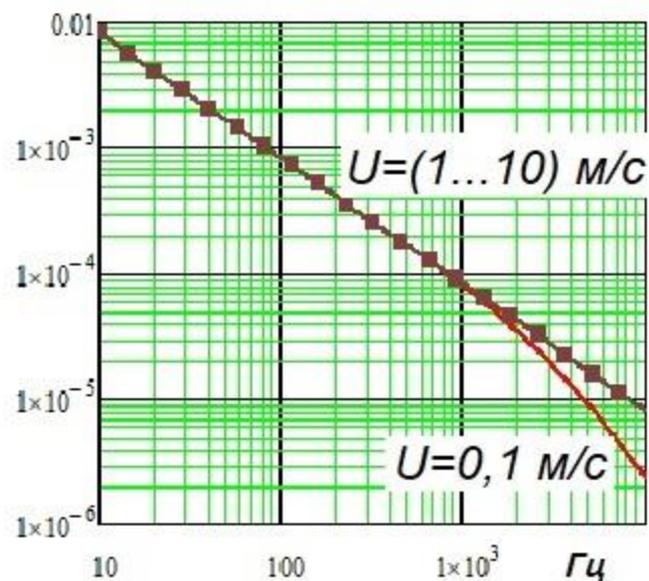
χ – температуропроводность



$\chi = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ M}^2/\text{C}; h = 15 \text{ мм}$



$\chi = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ M}^2/\text{C}; h = 1 \text{ мм}$



----- $\frac{\chi}{\omega h^2}$

Степень влияния температурного сигнала определяется отношением

$$\frac{\Phi_{SS}^T(\omega)}{\Phi_{SS}^p(\omega)} = \frac{\gamma_T^2 S_T(\omega/U, \omega) P_{TT}(\omega/U)}{\gamma_p^2 \Phi_{pp}(\omega) U} \quad (9)$$

температурной характеристики (6) к частотному спектру $\Phi_{SS}^p(\omega)$ «полезного» сигнала, обусловленного пульсациями пристеночного давления со спектром $\Phi_{pp}(\omega)$.

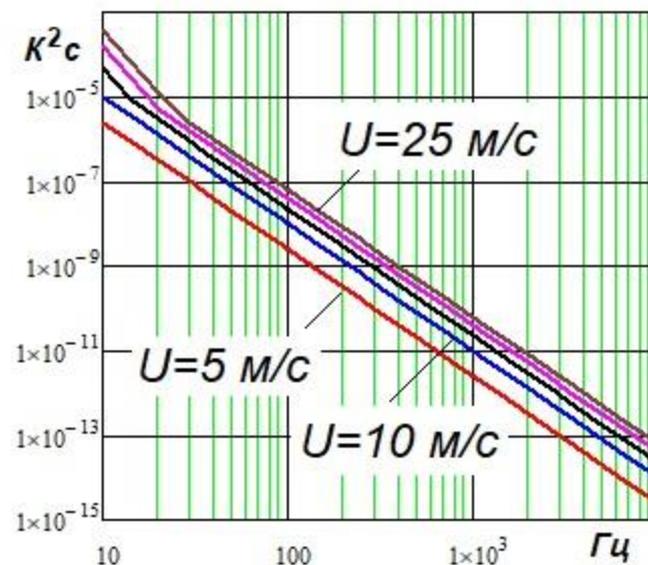
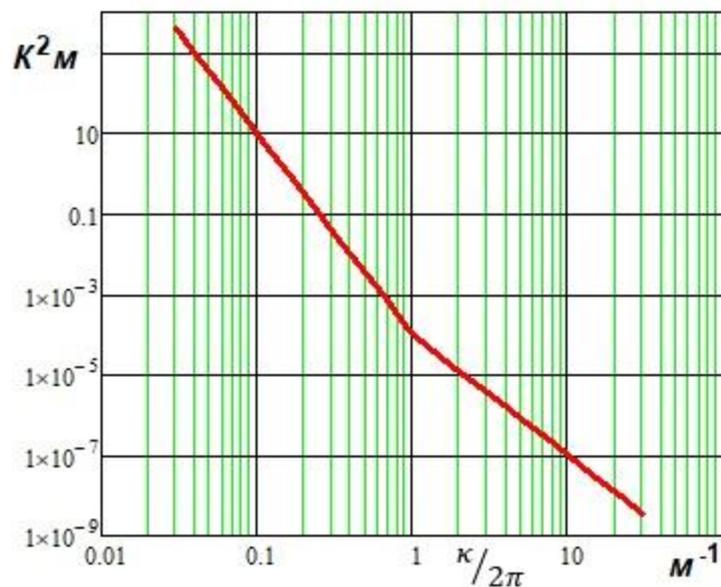
Конкретные оценки получены, используя данные И.Д. Лозовацкого по спектральной плотности температурной неоднородности в Балтийском море, приведенные в монографии Монин, Озмидов [5]. Модельная зависимость спектральной плотности температуры, $K^2 \cdot m$, от волнового числа κ , m^{-1} , приближенно представлена в виде:

$$P_{TT}(\kappa) = \begin{cases} 10^{-4} (\kappa/2\pi)^{-5} & \text{при } \kappa/2\pi \leq 1 \text{ м}^{-1} \\ 10^{-4} (\kappa/2\pi)^{-3} & \text{при } \kappa/2\pi > 1 \text{ м}^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

2. Волновой и частотные спектры температуры на поверхности обтекания:

$$P_{TT}(\kappa) = \begin{cases} 10^{-4}(\kappa/2\pi)^{-5} & \text{при } \kappa/2\pi \leq 1 \text{ м}^{-1} \\ 10^{-4}(\kappa/2\pi)^{-3} & \text{при } \kappa/2\pi > 1 \text{ м}^{-1} \end{cases} \quad (\text{Лозовацкий И.Д. 1977})$$

$$\Phi_{TT}(\omega) = \frac{1}{U} P_{TT}(\omega/U)$$

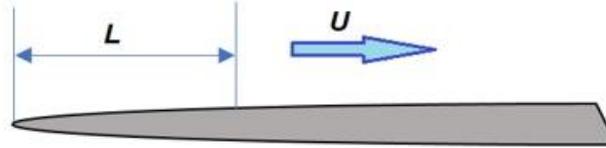


Частотный спектр турбулентных давлений оценивается по эмпирической спектральной модели Goody [9]:

$$\Phi_{pp}(\omega) = \frac{(\rho U_{\tau}^2)^2 \delta}{U} \frac{3 \cdot (\omega \delta / U)^2}{\left[(\omega \delta / U)^{0,75} + 0,5 \right]^{3,7} + \left[(1,1 R_T^{-0,57}) \omega \delta / U \right]^7}. \quad (11)$$

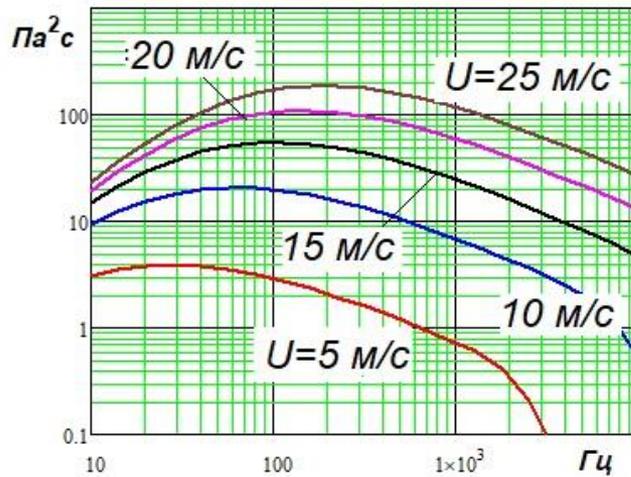
Здесь $R_T = \frac{U_{\tau}^2 \delta}{U \nu}$; ρ и ν - соответственно плотность и кинематическая вязкость обтекающей жидкости; δ - толщина пограничного слоя; $U_{\tau} = \sqrt{\tau / \rho}$, где τ - касательное напряжение на стенке.

3. Частотный спектр пульсаций давления

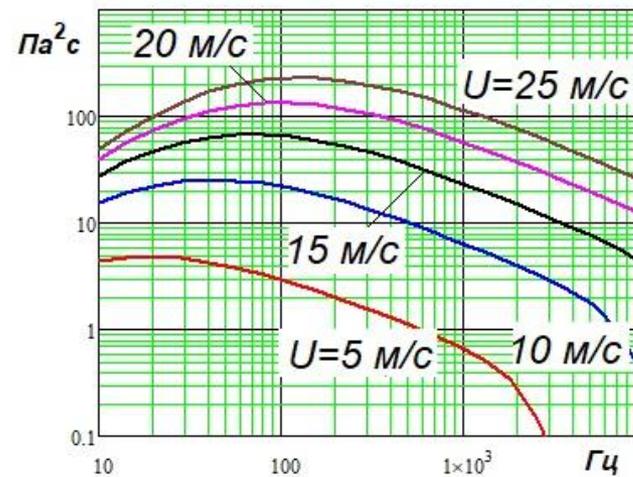


$$\Phi_{pp}(\omega) = \frac{(\rho U_T^2)^2 \delta}{U} \frac{3 \cdot (\omega \delta / U)^2}{\left[(\omega \delta / U)^{0.75} + 0.5 \right]^{3.7} + \left[(1.1 R_T^{-0.57}) \omega \delta / U \right]^7} \quad R_T = \frac{U_T^2 \delta}{U \nu} \quad (\text{Goody M. 2004})$$

$L = 3 \text{ м}$



$L = 5 \text{ м}$



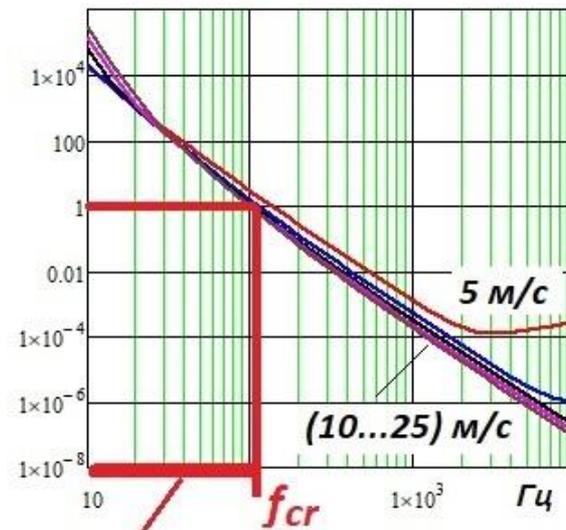
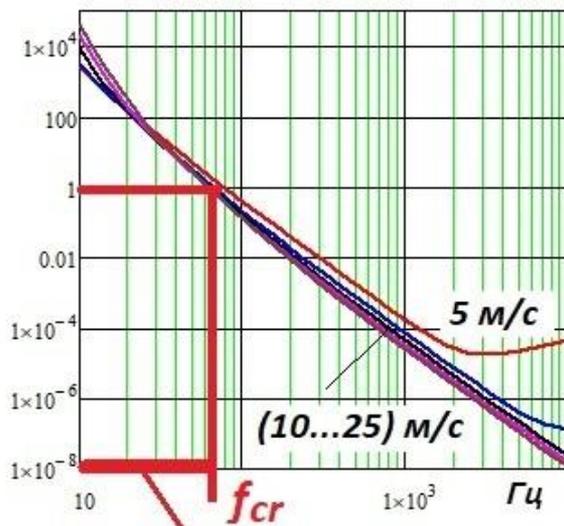
Модельные представления (10, 11), конкретизирующие форму спектральных характеристик, входящих в соотношение (9), позволяют определить относительную роль пульсаций температуры в формировании сигнала приемника турбулентных давлений при заданном режиме течения. Такие расчеты были проведены применительно к всплывающему устройству [Акуст. журн. 2013] в диапазоне скоростей 5 - 25 м/с (соответствующие значения U_τ в зонах расположения приемников составляли от 0.16 до 0.69 м/с, толщины пограничного слоя δ – от 30 до 50 мм).

4. Отношение спектральных компонент температурного и динамического сигналов

$$\frac{\Phi_{SS}^T(\omega)}{\Phi_{SS}^p(\omega)} = \frac{\gamma_T^2 S_T(\omega/U, \omega) P_{TT}(\omega/U)}{\gamma_p^2 \Phi_{pp}(\omega) U}$$

$$\chi = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad h = 15 \text{ мм}$$

$$\chi = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; \quad h = 1 \text{ мм}$$

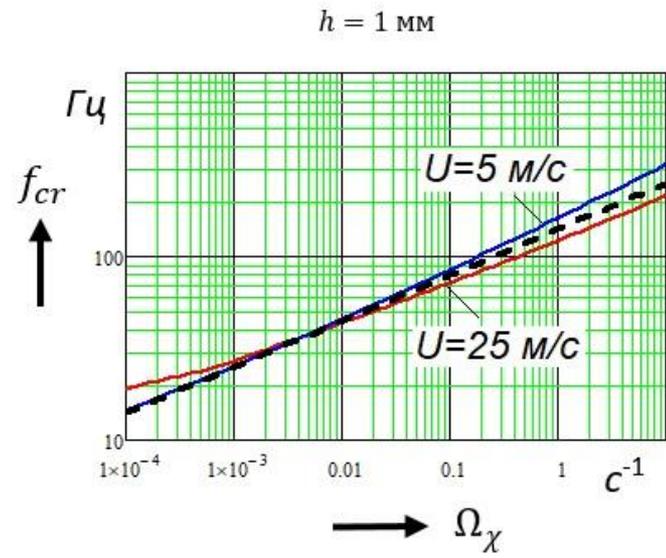
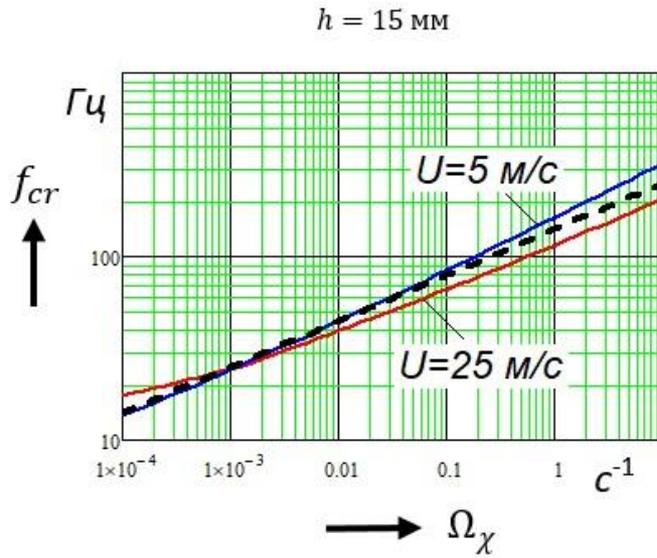


**Зоны доминирования
температурного сигнала**

Результаты расчетов показывают, что в зоне значимого влияния температурной неоднородности величина отношения $\Phi_{SS}^T(\omega)/\Phi_{SS}^P(\omega)$ быстро уменьшается с ростом частоты, при этом сама зависимость определяется «тепловой» частотой Ω_χ приемника. Параметры обтекания и размеры приемника практически не влияют на значения пороговой критической частоты f_{cr} , при которой отношение (9) становится равным единице. Соответственно, ниже этой частоты, определяемой величиной Ω_χ , температурный сигнал становится выше «полезного».

5. Критические частоты воздействия температурной помехи

$$\Omega_\chi = \frac{\chi}{h^2}$$



$$\text{---} \quad \frac{f_{cr}}{f_0} = 250 \left(\frac{\Omega_\chi}{\Omega_0} \right)^{0,25} \quad f_0 = 1 \text{ Гц} \quad \Omega_0 = 10 \text{ с}^{-1}$$

$$f_{cr} \sim 1/\sqrt{h}$$

Полученные расчетные зависимости $f_{cr}(\Omega_{\chi})$ в широком диапазоне значений «тепловой» частоты от 10^{-4} с^{-1} до 10 с^{-1} могут быть аппроксимированы единой формулой

$$\frac{f_{cr}}{f_0} \approx 250 \left(\frac{\Omega_{\chi}}{\Omega_0} \right)^{0,25} \quad (f_0 = 1 \text{ Гц}, \Omega_0 = 10 \text{ с}^{-1}) \quad (12)$$

которая обоснована для характеристики (10) температурной неоднородности, исходящей из конкретных данных монографии Монин, Озмидов [5].

Применение данной зависимости к оценке измерений турбулентных пульсаций давления показывает, что в рассматриваемых условиях температурная неоднородность оказывает существенное влияние на сигналы двух типов приемников турбулентных давления на частотах ниже 130 Гц и 215 Гц.

Основные результаты доклада опубликованы в статье [4].

ВЫВОДЫ

Представлены оценки частотных характеристик температурного сигнала при регистрации турбулентных пульсаций давления для заданных параметров температурой стратификации водной среды. Определены параметры пороговой критической частоты, ниже которой температурный сигнал преобладает над пульсациями давления. Параметры обтекания и размеры чувствительной поверхности приемника пульсаций давления не влияют на значения критической частоты. Для приемников, используемым в наших экспериментах, значения пороговой критической частоты составляют 130 и 215 Гц.

Публикации.

1. Кудашев Е.Б., Колышницын В.А., Маршов В.П. и др. Экспериментальное моделирование гидродинамических шумов обтекания на Автономной морской лаборатории // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 211–221.
2. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р., Jian-Nua L. Приемник турбулентных пульсаций давления в температурно-стратифицированной среде // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 94–99.
3. Goody M. Empirical spectral model of surface pressure fluctuations // AIAA J. 2004. V. 42 (9). P. 1788–1794.
4. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. Тепловая помеха при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 6, С. 932–941.
5. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. - Л.: Гидрометеоздат, 1981.