

УДК 534.522

ТЕПЛОВАЯ ПОМЕХА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВСПЛЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

© 2023 г. Е. Б. Кудашев^а, *, Л. Р. Яблоник^б, **

^аИнститут космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, Москва, 117997 Россия

^бНаучно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова, ул. Атаманская 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

*e-mail: kudashhev@iki.rssi.ru

**e-mail: yablonik@gmail.com

Поступила в редакцию 03.07.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

Исследована тепловая помеха при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства при заданных экспериментальных параметрах температурной стратификации водной среды. Исследован эффект искажения спектральных уровней пульсаций давления, регистрируемых приемником звука в поле температурных неоднородностей, на примере измерений турбулентных пульсаций давления в пограничном слое при вертикальном всплытии устройства с заданной глубины. Показано, что при умеренных скоростях обтекания, превышающих 1–2 м/с, температурная восприимчивость пьезокерамического приемника в решающей мере определяется его характерной “тепловой” частотой. Определены параметры пороговой критической частоты, ниже которой температурный сигнал (тепловая помеха) преобладает над “полезным” сигналом, порождаемым пульсациями давления. Применительно к приемникам, используемым в экспериментах на всплывающем устройстве [7], значения пороговой критической частоты составляют 130 и 215 Гц.

Ключевые слова: турбулентные пульсации давления, температурная неоднородность среды, тепловая помеха

DOI: 10.31857/S0320791923600713, EDN: CQBEVE

ВВЕДЕНИЕ

Поле турбулентных давлений на поверхности обтекания, как правило, включает в себя весомую длинноволновую составляющую, формируемую акустическим полем в зоне течения [1–4]. В лабораторных исследованиях эта составляющая, связанная с работой оборудования и другими сторонними источниками, рассматривается как акустическая помеха, устранение или подавление которой представляет собой одну из важных задач проведения корректных измерений [5]. Применительно к водной среде эта задача решается путем использования всплывающих устройств, оснащенных автономным измерительным комплексом. Всплывающее устройство представляет собой удлиненное тело вращения, имеющее в погруженном состоянии избыточную архимедову плавучесть и по этой причине способное самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории. Принципы, реализованные при создании всплывающего устройства, позволяют проводить исследования акустико-гидро-

динамических процессов в турбулентном пограничном слое при высоких числах Рейнольдса (до значений 10^8), при этом данные измерений практически не искажаются посторонними акустическими шумами, т.к. движение устройства вызывается исключительно градиентом поля гидростатического давления.

Результаты экспериментальных исследований шумов обтекания с применением установки этого типа представлены в работе [6]. В России всплывающее устройство было разработано в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (Крыловский Научный центр). Его подробное описание приведено в [7]. Для дальнейшего рассмотрения существенно, что измерения пристеночных турбулентных давлений выполняются в различных точках измерительной секции двумя типами пьезокерамических преобразователей давления: стержневыми (трубчатыми) глубиной около 15 мм с приемной поверхностью диаметром 1.3 мм и пластинчатыми приемниками толщиной около 1 мм с диамет-

ром приемной поверхности 20 мм; при этом скорости обтекания составляли 8–22 м/с.

Поскольку используемая в приемниках пьезо-керамика обладает также пьезоэлектрическими свойствами, при всплытии устройства в температурно-стратифицированной среде на выходе преобразователей пульсаций давления генерируется дополнительный “температурный” сигнал, который рассматривается как тепловая помеха.

В данной работе проводятся конкретные оценки параметров тепловой помехи применительно к всплывающему устройству [7] в условиях температурной неоднородности среды, представленной в книге [8] по результатам исследований [9]. Оценки основываются на общем подходе, предложенном в [10]; некоторые результаты ранее обсуждались авторами в докладе на XVII Школе-семинаре “Акустика океана” имени акад. Л.М. Бревовских [11].

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК ДАВЛЕНИЯ В ТЕМПЕРАТУРНО-НЕОДНОРОДНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

По имеющимся данным [10, 12, 13], соотношение между чувствительностью приемников к температуре (γ_T , В/К) и давлению (γ_p , В/Па) может быть оценено величиной $\Gamma_{Tp} = 2 \times 10^6$ Па/К, что примерно соответствует произведению коэффициента линейного теплового расширения на модуль Юнга пьезокерамики. Данная величина соответствует полному прогреву приемника, который в условиях измерений турбулентных пульсаций в температурно-неоднородной среде никогда не достигается. При этом для определения реального влияния температурного фактора на работу приемника пристеночных турбулентных давлений следует, прежде всего, оценить, в какой степени пульсации температуры прогревают корпус пьезоэлемента.

Согласно модели, развитой в [10], приемник, непосредственно контактирующий с обтекающей средой, характеризуемой граничным температурным полем $T_0(\mathbf{k}, \omega)$ (\mathbf{k} – двумерный волновой вектор, ω – угловая частота), формирует в силу пьезоэффекта электрический сигнал с амплитудой $e_T(\mathbf{k}, \omega)$. Среднеквадратичное значение этого сигнала для приемника, встроенного в обтекаемое тело, определяется равенством

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

в котором

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

$$\alpha = \sqrt{R} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad \beta = \sqrt{R} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

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

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

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

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

Далее рассмотрим влияние температурных неоднородностей среды на конкретном примере исследования шумов обтекания, создаваемых турбулентными пульсациями давления в пограничном слое на теле всплывающего устройства.

В рамках модели “замороженности” спектральные частотно-волновой спектр и температурная неравномерность среды связаны простым соотношением

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

где $P_{TT}(\mathbf{k})$ – спектр вертикальной температурной неоднородности в зоне всплывающего устройства. Соответственно выражение (3) для частотного спектра температурного сигнала приобретает вид:

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

Расчеты показывают (рис. 1), что при умеренных скоростях обтекания, превышающих 1–2 м/с, частотная зависимость температурной характеристики S_T определяется лишь характерной “тепловой” частотой

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

приемника пульсаций давления. Соответственно, волновая характеристика практически перестает зависеть от скорости, так что

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

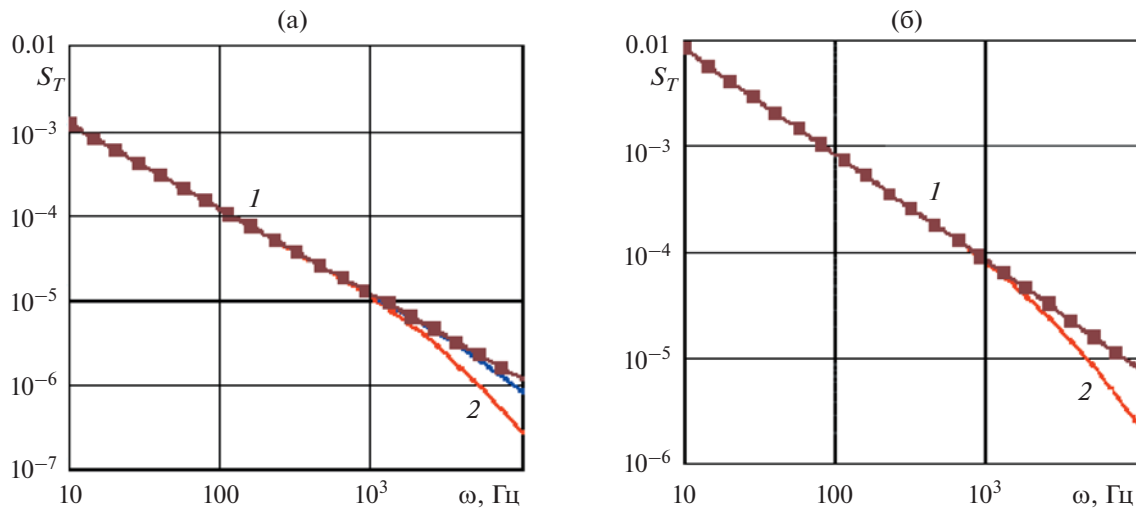


Рис. 1. Температурная передаточная характеристика $S_T(\omega/U, \omega)$, формула (4). Приемники: (а) – стержневой, 1 – $U = 1-10$ м/с, 2 – $U = 0.5$ м/с; (б) – пластинчатый, 1 – $U = 1-10$ м/с, 2 – $U = 0.1$ м/с. ■■■■■ – приближение (8).

Параметр “тепловая” частота Ω_χ практически определяется лишь геометрией используемого преобразователя давления; величина параметра Ω_χ может изменяться в довольно широких пределах. В частности, для используемых на всплывающем устройстве [7] двух типов приемников параметр Ω_χ оценивается значениями 0.073 и 0.55 с⁻¹. При этом, в силу конструктивных особенностей, температуропроводность χ стержневого приемника, определяемая тепловыми свойствами стального корпуса, характеризуется величиной 16.4×10^{-6} м²/с, а соответствующее значение для пластинчатого приемника задается типичным для керамики значением 5.5×10^{-7} м²/с.

Степень влияния температурного сигнала определяется отношением

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

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

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ВСПЛЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Для конкретных оценок воспользуемся приведенными в [8] данными [9] по спектральной плотности температурной неоднородности в Балтийском море. В соответствии с этими данными (рис. 2), модельная зависимость спектральной плотности

температуры, K^2 м, от волнового числа κ , м⁻¹, может быть приближенно представлена в виде:

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

Частотный спектр турбулентных давлений оценивается согласно получившей широкое признание [3] эмпирической модели Гуди [14]. Согласно модели Гуди

$$\Phi_{pp}(\omega) = \frac{(\rho U_\tau^2)^2 \delta}{U} \times \frac{3(\omega\delta/U)^2}{\left[(\omega\delta/U)^{0.75} + 0.5 \right]^{3.7} + \left[(1.1 R_T^{-0.57}) \omega\delta/U \right]^7}, \quad (11)$$

где $R_T = \frac{U_\tau^2 \delta}{U \nu}$; ρ и ν – соответственно плотность и кинематическая вязкость обтекающей жидкости; δ – толщина пограничного слоя; $U_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$, τ – касательное напряжение на стенке. В работе оценки частотного спектра пульсаций давления были проведены применительно к поверхности измерительной секции устройства [7] в диапазоне скоростей всплытия 5–25 м/с (соответствующие значения U_τ в зонах расположения приемников составляли от 0.17 до 0.79 м/с, толщины пограничного слоя δ – от 35 до 68 мм).

Модельные представления (10), (11), конкретизирующие форму спектральных характеристик, входящих в соотношение (9), позволяют определить относительный вклад пульсаций температуры в формирование сигнала приемника турбу-

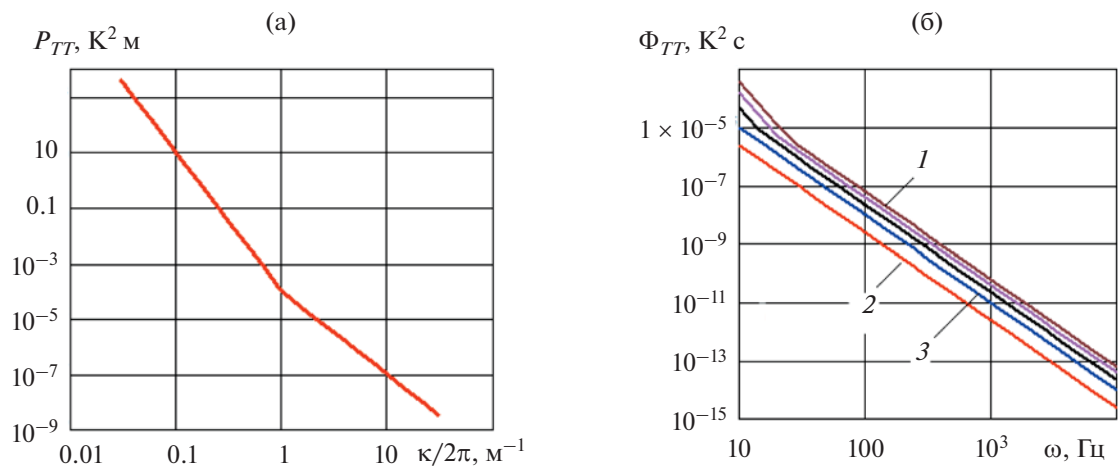


Рис. 2. Волновой и частотные спектры температуры на поверхности обтекания. (а) – Волновой спектр $P_{TT}(k)$ (10); (б) – соответствующие частотные спектры $\Phi_{TT}(\omega) = \frac{1}{U} P_{TT}(\omega/U)$, 1 – $U = 1$ м/с, 2 – $U = 5$ м/с, 3 – $U = 10$ м/с.

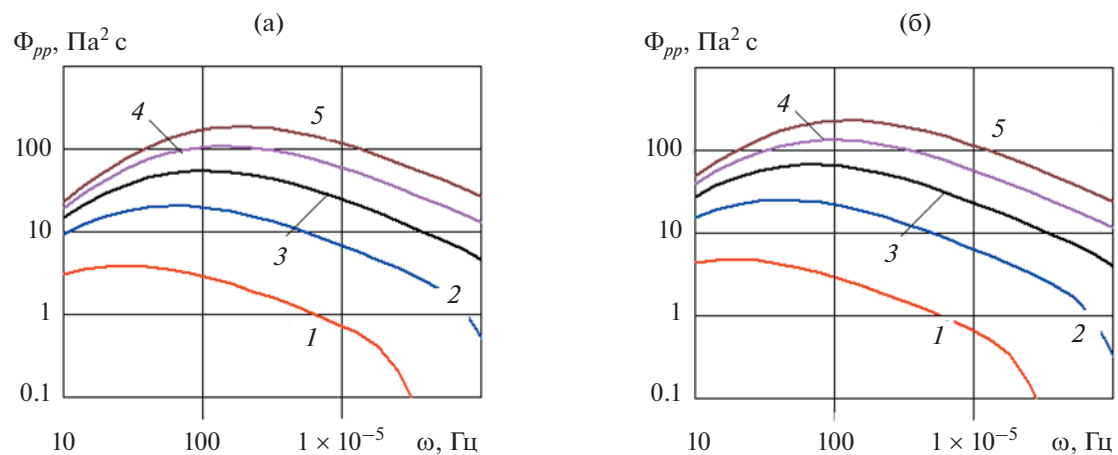


Рис. 3. Частотный спектр пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства в зонах расположения приемников. Расчет по формуле (11). (а) – Передняя зона, (б) – тыловая зона. 1 – $U = 5$ м/с, 2 – $U = 10$ м/с, 3 – $U = 15$ м/с, 4 – $U = 20$ м/с, 5 – $U = 25$ м/с.

лентных давлений при заданном режиме обтекания всплывающего устройства.

Результаты расчетов (рис. 4) показывают, что в зоне значимого влияния температурной неоднородности величина отношения (9) быстро уменьшается с ростом частоты, при этом сама зависимость в решающей мере определяется “тепловой” частотой приемника. В частности, 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”.

Полученные расчетные зависимости $f_{cr}(\Omega_\chi)$ (рис. 5) в широком диапазоне значений “тепловой” частоты от 10^{-4} до 10 s^{-1} могут быть аппроксимированы единой формулой

$$\frac{f_{cr}}{f_0} \approx 250 \left(\frac{\Omega_\chi}{\Omega_0} \right)^{0.25}, \quad f_0 = 1 \text{ Гц}, \quad \Omega_0 = 10 \text{ с}^{-1}, \quad (12)$$

которая обоснована для характеристики (10) температурной неоднородности, исходящей из конкретных данных [8, 9]. В силу определения (7) последнее равенство означает, что критическая частота обратно пропорциональна квадратному корню из протяженности приемника в направлении нормали к стенке

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

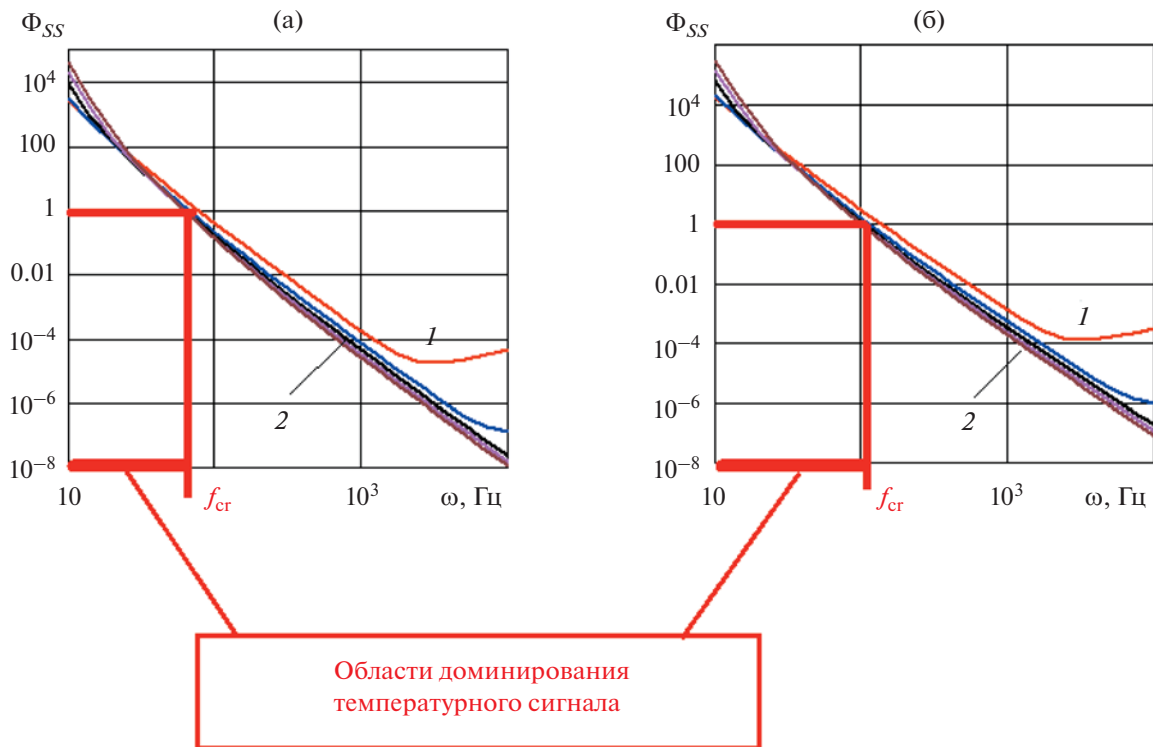


Рис. 4. Отношение спектральных компонент температурного и динамического сигналов на пьезокерамических приемниках всплывающего устройства [7]. Расчет по соотношению (9), тыловая зона расположения приемников. Приемники: (а) – стержневой, (б) – пластинчатый. 1 – $U = 5$ м/с, 2 – $U = 10-25$ м/с.

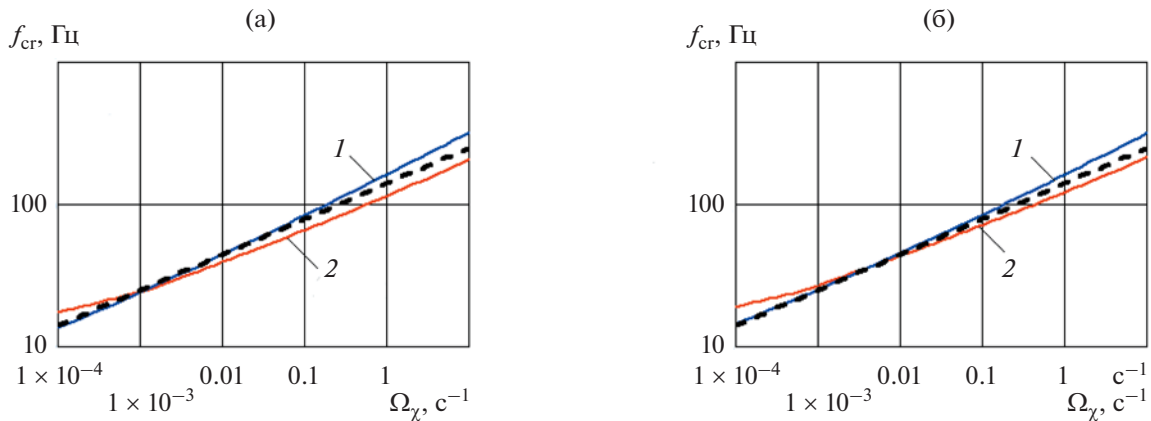


Рис. 5. Критические частоты воздействия температурной помехи. Сравнение расчетных данных с аппроксимирующей формулой (12) (штриховая кривая). Приемники: (а) – стержневой, (б) – пластинчатый. 1 – $U = 5$ м/с, 2 – $U = 25$ м/с.

Применение зависимости (12) к оценке изменений на всплывающем устройстве [7] показывает, что в рассматриваемых условиях температурная неоднородность оказывает существенное влияние на сигналы двух используемых типов приемников турбулентных давлений на частотах ниже 130 и 215 Гц.

Отметим, что близкая оценка частотной границы влияния температурной помехи получена на основании качественного анализа в работе [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены оценки частотных характеристик тепловой помехи при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего измерительного устройства при заданных экспериментальных параметрах температурной стратификации водной среды.

Показано, что при умеренных скоростях обтекания, превышающих 1–2 м/с, температурная восприимчивость пьезокерамического приемни-

ка давления в решающей мере определяется его характерной “тепловой” частотой Ω_χ (7).

Определены параметры пороговой критической частоты, ниже которой температурный сигнал-помеха преобладает над “полезным” сигналом, порождаемым пульсациями давления. Проведенные исследования показали, что параметры обтекания и размеры чувствительной поверхности приемника пульсаций давления практически не влияют на значения пороговой критической частоты, а ее значения для исследованного температурного поля пропорциональны $\sqrt[4]{\Omega_\chi}$. В частности, применительно к приемникам, используемым в экспериментах на всплывающем устройстве [7], значения пороговой критической частоты составляют 130 и 215 Гц.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема “Мониторинг” № 122042500031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Howe M.S.* Acoustics of Fluid-Structure Interactions. Cambridge University Press, 1998. 560 p.
2. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пристеночные пульсации давления. М.: Научный мир, 2007. 223 с.
3. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Развитие экспериментальных исследований турбулентных пристеночных пульсаций давления. Критический анализ и обобщение накопленных опытных данных // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 639–649.
4. *Бычков О.П., Фараносов Г.А.* Локальный метод разделения звуковых и псевдозвуковых пульсаций // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 6. С. 722–737.
5. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Регистрация частотного спектра пристеночных турбулентных давлений на фоне акустического шума // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 6. С. 632–637.
6. *Huddle G., Skudrzyk E.* The Physics of Flow Noise // J. Acoust. Soc. Am. 1969. V. 46. P. 130–157.
7. *Кудашев Е.Б., Колюшницын 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.
8. *Монин А.С., Озмидов Р.В.* Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
9. *Лозовацкий И.Д.* Исследование мелкомасштабных температурных неоднородностей в южной части Балтийского моря // Океанология. 1977. Т. 17. № 2. С. 214–220.
10. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р., Jian-Hua L.* Приемник турбулентных пульсаций давления в температурно-стратифицированной среде // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 94–99.
11. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Температурная помеха при измерении шумов обтекания в глубоком море // Докл. XVII Школы-семинара “Акустика океана” им. акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXXIII сессией Российского акустического общества. С. 237–242. М.: Институт океанологии РАН, 2020.
12. *Бугулавская С.Н., Романенко Е.В., Холод Л.И.* Использование пьроэлектрического эффекта в акустических измерениях // Акуст. журн. 1971. Т. 17. № 2. С. 210–216.
13. *Паньков А.А.* Пьроэлектрические свойства пористого титаната бария // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 11. С. 1–10.
14. *Goody M.* An empirical model of surface pressure fluctuations // AIAA J. 2004. V. 42. P. 1788–1794.
15. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Влияние температурной неоднородности среды на регистрируемые пьезоприемником шумы обтекания // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 1. С. 127–128.