Е.Б. Кудашев, Л.Р. Яблоник

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОМЕХА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ШУМОВ ОБТЕКАНИЯ В ГЛУБОКОМ МОРЕ

*Институт космических исследований РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32,
Тел.: 8(495)333-1234,
E-mail: kudashhev@iki.rssi.ru; yablonik@gmail.com*

Рассматривается формирование отклика пьезокерамических приемников пульсаций давления в температурно-стратифицированной среде при воздействии на чувствительный элемент датчиков пульсаций температуры рабочей среды. Выполнено численное исследование ослабления температурного сигнала приемника давления в турбулентном пограничном слое. Исследован эффект искажения спектральных уровней пульсаций давления, регистрируемых приемником звука в поле температурных неоднородностей. Также исследовано влияние температурной помехи на измерение шумов обтекания на всплывающем устройстве на примере измерений турбулентных пульсаций давления в пограничном слое при вертикальном всплытии устройства в глубоком море.

Ключевые слова: шумы обтекания, турбулентные пульсации давления, влияние температурной неоднородности

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 также пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрический эффект состоит в генерации электрического поля в кристаллах при изменении их температуры. В силу этого эффекта изменение температуры приводит к генерированию дополнительного электрического сигнала на выходе преобразователя пульсаций давления.

Специальные исследования термочувствительности приемников турбулентных пульсаций давления до настоящего времени не проводились. Согласно имеющимся данным [1–3] соотношение между чувствительностью приемников к температуре (γ_T , В/К) и давлению (γ_p , В/Па) может быть оценено величиной: 2×10^6 Па/К, что примерно со-

ответствует 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 [1], приемник, непосредственно контактирующий с обтекающей средой, характеризуемой граничным температурным полем $T_0(\mathbf{\kappa}, \omega)$ ($\mathbf{\kappa}$ – двумерный волновой вектор, ω – угловая частота), формирует в силу пирозффекта электрический сигнал с амплитудой: $e_T(\mathbf{\kappa}, \omega)$. Среднеквадратичное значение этого сигнала для приемника, встроенного в обтекаемое тело, определяется равенством:

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

в котором

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

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:

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

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

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

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

вок для исследования псевдозвука получил широкое распространение при экспериментальных исследованиях физики акустико-гидродинамических явлений [4–6].

В рамках модели «замороженности» спектральный частотно-волновой спектр и температурная неравномерность среды связаны простым соотношением:

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

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

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

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

$$\Omega_\chi = \chi/h^2. \quad (7)$$

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

$$S_T \approx \Omega_\chi / \omega. \quad (8)$$

Параметр Ω_χ практически определяется лишь геометрией используемого преобразователя, его величина может изменяться в довольно широких пределах. В частности, в экспериментах [6] использовались два типа приемников, значения Ω_χ для которых оцениваются значениями 0.073 с⁻¹ и 0.55 с⁻¹.

Степень влияния температурного сигнала определяется отношением

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

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

Для конкретных оценок воспользуемся приведенными в [7, рис.10.8] данными [8] постспектральной плотности температурной неоднородности в Балтийском море. В соответствии с этими данными, модельная зависимость спектральной плотности температуры, К²×м, от волнового числа κ , м⁻¹, может быть приближенно представлена в виде:

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

Частотный спектр турбулентных давлений оценивается по модели [9]:

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

Здесь $R_T = U_\tau^2 \delta / U \nu$; 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.

Модельные представления (10, 11), конкретизирующие форму спектральных характеристик, входящих в соотношение (9), позволяют определить относительную роль пульсаций температуры в формирование сигнала приемника турбулентных давлений при заданном режиме течения. Такие расчеты были проведены применительно к всплывающему устройству [6] 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).

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 в решающей мере определяется «тепловой» частотой Ω_χ 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 $f_{cr}(\Omega_\chi)$ в широком диапазоне значений «тепловой» частоты от 10^{-4} с^{-1} до 10 с^{-1} могут быть аппроксимированы единой формулой:

$$f_{cr}(\text{Гц}) \approx 250 \times \Omega_\chi^{0.25}, \quad (12)$$

которая обоснована для характеристики (10) температурной неоднородности, исходящей из конкретных данных [7, 8]. Применение данной зависимости к оценке измерений на всплывающем устройстве [6] показывает, что в рассматриваемых условиях температурная неоднородность оказывает существенное влияние на сигналы двух используемых типов приемников турбулентных пульсаций давления на частотах ниже 130 Гц и 215 Гц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00181.

Литература

1. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. Приемник турбулентных пульсаций давления в температурно-стратифицированной среде // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 94–99.
2. Бугулавская С.Н., Романенко Е.В., Холод Л.И. Использование пьезоэлектрического эффекта в акустических измерениях // Акуст. журн. 1971. Т. 17. № 2. С. 210–216.
3. Паньков А.А. Пьезоэлектрические свойства пористого титаната бария // Журнал радиоэлектроники / Гл. ред. акад. Гуляев Ю.В. ZhRE. 11. 2014.
4. Haddle G. and Skudrzyk E. The Physics of Flow Noise. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1969. Vol. 46. P. 130–157.
5. Кудашев Е.Б. Экспериментальные исследования шумов обтекания на всплывающем устройстве // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 488–499.
6. Кудашев Е.Б., Колышницын 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.
7. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 320 с.
8. Лозовацкий И.Д. Исследование мелкомасштабных температурных неоднородностей в южной части Балтийского моря // Океанология. 1977. Т. 17. № 2. С. 214–220.
9. Goody M. Empirical spectral model of surface pressure fluctuations // AIAA J. 2004. Vol. 42 (9). pp. 1788–1794.

E.B. Kudashev, L.R. Yablonik

INFLUENCE OF TEMPERATURE INTERFERENCE IN MEASURING FLOW NOISE IN DEEP SEA

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
Profsovnaya Str., 84/32, Moscow, 117997, Russia.*

Tel.: 8(495) 333-12-34, E-mail: kudashev@iki.rssi.ru, yablonik@gmail.com

Pressure fluctuations in a turbulent boundary layer are one of the most important dynamic characteristics of a flow and attract the attention of researchers when studying problems of turbulence and sound generation by a turbulent flow. The purpose of this paper is to study the measurement of near-wall pressure fluctuations under conditions of temperature interference. The operation of an acoustic transducer in a temperature-stratified medium is investigated. The formation of a response of piezoceramic transducers of pressure fluctuations under the action of temperature fluctuations in a working medium on the sensor element is considered. The attenuation of the temperature signal of a pressure transducer in a turbulent boundary layer is calculated numerically. The effect of distortions of the spectral levels of pressure fluctuations detected by a sound transducer in the field of temperature

inhomogeneity is investigated for the example of measurements of turbulent pressure fluctuations in a boundary layer during vertical ascent of the device to the surface from a specified depth in a deep sea. The reported study was funded by RFBR, project number 20-02-00181.

Keywords: wall-pressure fluctuations, temperature interference, measurements in a deep sea

Acknowledgment: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-02-00181.

References

1. Kudashev E.B. and Jablonik L.R. Priemnik turbulentnyh pul'sacij davlenija v temperaturno-stratificirovannoj srede. Akust. Zhurn., 2018, Vol. 64, No. 1, pp. 94–99.
2. Buguslavskaja S.N., Romanenko E.V., and Holod L.I. Ispol'zovanie pirojelek-tricheskogo effekta v akusticheskikh izmerenijah. Akust. Zhurn., 1971, Vol. 17, No. 2, pp. 210–216.
3. Pan'kov A.A. Pirojelektricheskie svojstva poristogo titanata barija. Zhurnal radioelektroniki, Glavnyj redaktor akad. Guljaev Ju.V., ZhRE, Vol. 11, 2014.
4. Haddle G. and Skudrzyk E. The Physics of Flow Noise. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1969, Vol. 46, pp. 130–157.
5. Kudashev E.B. Jeksperimental'nye issledovanija шумов обтекания на vsplyvajushhem ustrojstve. Akust. Zhurn., 2005, Vol. 51, No. 4, pp. 488–499.
6. Kudashev E.B., Kolyshnicyn V.A., Marshov V.P., Tkachenko V.M., and Cvetkov A.M. Jeksperimental'noe modelirovanie gidrodinamicheskikh шумов обтекания на Avtonomnoj morskoy laboratorii. Akust. Zhurn., 2013, Vol. 59, Vol. 2, pp. 211–221.
7. Monin A.S. and Ozmidov R.V. Okeanskaja turbulentnost'. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 320 p.
8. Lozovackij I.D. Issledovanie melkomasshtabnyh temperaturnyh neodnorodnostej v juzhnoj chasti Baltijskogo morja. Okeanologija, 1977, Vol. 17, No. 2, pp. 214–220.
9. Goody M. Empirical spectral model of surface pressure fluctuations. AIAA J., 2004, Vol. 42 (9), pp. 1788–1794.