

ТУРБУЛЕНТНЫЕ СПЕКТРЫ ШУМОВ ОБТЕКАНИЯ НА АВТОНОМНОЙ МОРСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Е.Б. Кудашев^{1,2}, Н.И. Каленова¹, Г.В. Кенигсбергер³

¹ Институт космических исследований РАН,

² Механико-Математический Факультет МГУ

³ Гидрофизический институт Академии наук Абхазии

Email: kudashev@iki.rssi.ru

Аннотация. В глубоком море выполнены экспериментальные исследования пространственно-временной структуры турбулентных пульсаций давления при обтекании Автономной морской лаборатории. Автономная морская лаборатория создана на основе всплывающего устройства, оснащенного современной цифровой аппаратурой автономной регистрации. Значительно расширен частотный диапазон исследования турбулентных спектров - вплоть до 80 кГц. Исследованы модели взаимных спектров турбулентных пульсаций давления под однородным турбулентным пограничным слоем на гладкой плоской поверхности, обтекаемой безградиентным потоком, и эффекты их воздействия на формирование шумов обтекания.

1. Автономная морская лаборатория

Проблемы динамики пристеночной турбулентности изучены на основе развития методов экспериментальных исследований турбулентных пульсаций в турбулентном пограничном слое [1-5]. Экспериментальные исследования турбулентных спектров шумов обтекания выполнены в сухумской акватории Черного моря, обладающей уникальным рельефом: по мере удаления от берега быстро нарастает глубина моря, на расстоянии 600 м - глубина моря достигает 200 м. Это позволило создать здесь Морской глубоководный стенд для исследования шумов обтекания. Схема морской инфраструктуры стенда показана на Рис.1; Всплывающее устройство и береговая инфраструктура - на Рис.2. Всплывающее устройство в погруженном состоянии имеет избыточную архимедову плавучесть и по этой причине способно самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории. Рабочий участок всплытия составляет 80 м. Скорость всплытия устройства изменялась от 8 до 22 м/с. Установившееся движение с заданной глубины длится более 10 с. На Рис. 3 представлена структура Всплывающего устройства: Измерительная секция с установленными на ней

преобразователями давления; Аппаратурная секция; Балластные цистерны; Гидростаты управления и отцепляющий гидростат. В преобразователях давления происходит преобразование турбулентных пульсаций давления, действующих на их чувствительную поверхность, в электрические сигналы. Для измерения шумов обтекания при разных скоростях набегающего потока обеспечено изменение положительной плавучести. Всплывающее устройство оснащено носовой и кормовой Балластными цистернами, которые при подготовке к всплытию могут быть заполнены полностью или частично. Морской глубоководный стенд и всплывающее устройство в комплексе представляют собой Автономную морскую лабораторию для исследования шумов обтекания без вмешательства оператора. Применение всплывающих устройств дает возможность проводить сложный акустико-гидродинамический эксперимент в турбулентном пограничном слое при высоких числах Рейнольдса (до значений 10^8) в автономных условиях, практически не искаженный посторонними помехами.

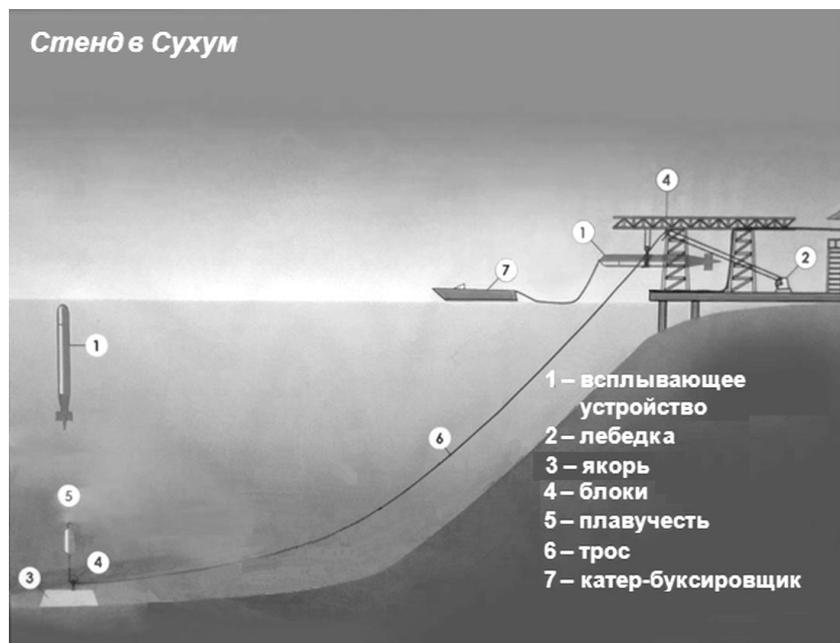


Рис 1. Морской глубоководный стенд и Всплывающее устройство.



Рис 2. Всплывающее устройство и береговая инфраструктура.



Рис. 3. Структура Всплывающего устройства.

2. Экспериментальные исследования спектров шумов обтекания

На Автономной морской лаборатории были выполнены экспериментальные исследования спектров мощности и взаимных спектров турбулентных пульсаций давления. Проведено большое количество измерений турбулентных спектров шумов обтекания точечными преобразователями диаметром 1,3мм, и уровней сигналов, воспринимаемых протяженными преобразователями диаметром 20 мм на скоростях движения от 8 до 22 м/сек.

Характерный вид спектров мощности турбулентных давлений (дБ отн. 2×10^{-5} Па/Гц^{1/2}), измеренных преобразователями давления диаметром 1,3 мм, в диапазоне скоростей от 8 до 22 м/сек и в диапазоне частот 0,2-20 кГц, представлен на рисунке 4.

На рисунке 5 приведены для сравнения спектры мощности, измеренные на скорости 22 м/сек в диапазоне частот 0,2-20 кГц преобразователями давления диаметром 1,3 мм и 20мм. Аналогичный вид имеют спектры, измеренные в диапазоне 0,2-80 кГц.

Особенностью всех измеренных спектров турбулентных пульсаций давления является то, что в экспериментах были обнаружены перегибы спада спектра в районе частот 8-10 кГц и, соответственно, приполнение высокочастотной области спектра вплоть до частот 80 кГц.

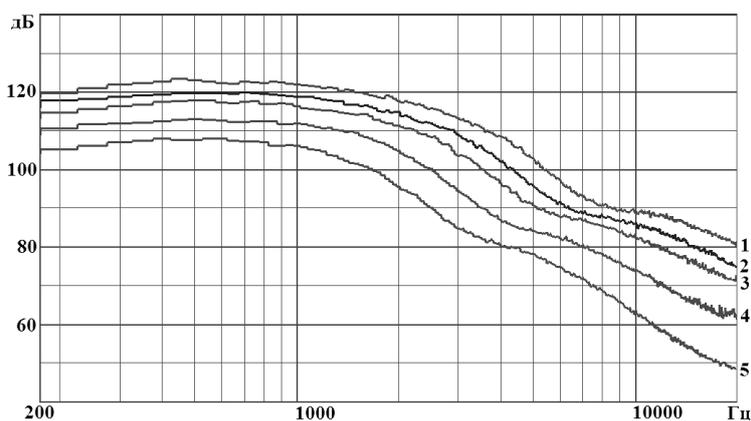


Рис 4. Спектры мощности турбулентных пульсаций давления. 1 - 22 м/сек; 2 - 17,5 м/сек; 3-15 м/сек; 4-10,5 м/сек; 4-10,5 м/сек; 5-8 м/сек.

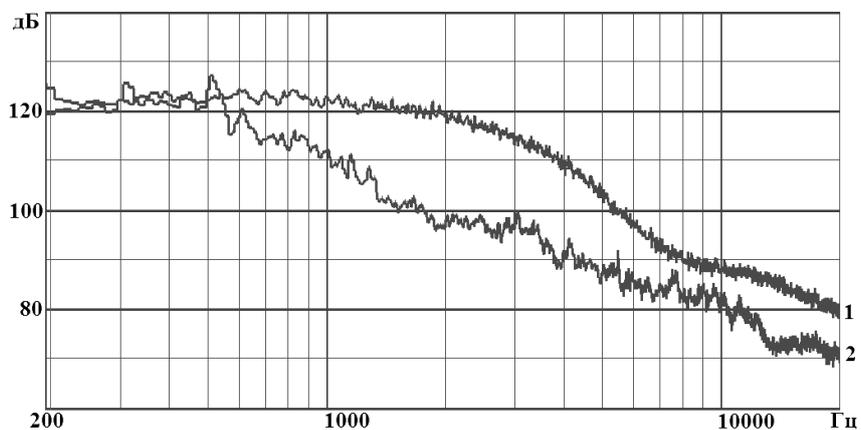


Рис. 5. Спектры мощности турбулентных пульсаций давления. Преобразователи давления: **1**- диаметр 1,3 мм и **2** - диаметр 20 мм.

То, что обнаруженное приполнение спектра на высоких частотах обусловлено турбулентными пульсациями давления, а не звуком или вибрациями, доказывают выполненные измерения безразмерного взаимного спектра турбулентных давлений. Результаты измерений взаимного спектра показали случайные флуктуации фазы и отсутствие когерентности на частотах выше 1 кГц.

3. Разрешающая способность регистрации турбулентных пульсаций

Выполненный в работе анализ экспериментальных данных позволил объяснить обнаруженные особенности спектров. Дело в том, что при регистрации выходные сигналы преобразователей не будут искажаться только в том случае, когда чувствительная поверхность преобразователя давления будет иметь бесконечно малую величину. Это условие означает: размеры чувствительной поверхности преобразователя должны быть много меньше самых мелкомасштабных компонент поля турбулентных давлений. Если это условие не выполняется, то будут неизбежно возникать искажения турбулентных пульсаций, и нужно уметь корректировать возникающие при измерениях искажения спектров. Эта задача получила название разрешающей

способности регистрации турбулентных пульсаций и для поля турбулентных давлений была исследована в работах [2,5,7,11].

Корректировочная функция частотного спектра мощности

$$\chi(\omega) = P_m(\omega) / P(\omega),$$

где $P_m(\omega)$ – измеренный (искаженный) спектр, $P(\omega)$ – истинный спектр, определяется выражением

$$\chi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\vec{\varepsilon}) \gamma_{re}(\vec{\varepsilon}, \omega) d(\varepsilon).$$

Здесь - $\gamma_{re}(\varepsilon, \omega)$ вещественная часть безразмерного взаимного спектра пульсаций давления и $\Theta(\vec{\varepsilon})$ - нормированная функция влияния, учитывающая характеристики преобразователей.

Знание корректировочной функции $\chi(\omega)$ позволяет восстановить истинный сигнал с помощью простой операции $P(\omega) = P_m(\omega) / \chi(\omega)$. При построении корректировочной функции часто используется однопараметрическая модель взаимного спектра Corcos [8]:

$$\gamma(\xi_1, \xi_3, \omega) = \exp\left(-\alpha_1 \frac{\xi_1 \omega}{U_c}\right) \exp\left(-i \frac{\xi_2 \omega}{U_c}\right) \exp\left(-\alpha_3 \frac{\xi_3 \omega}{U_c}\right) \quad (1)$$

где U_c - скорость конвективного переноса поля давлений вниз по потоку, ξ_i - компоненты вектора разделения между точками наблюдения в продольном ($i=1$) и поперечном ($i=2$) направлениях. Однако корректировка спектров турбулентных пульсаций давления, основанная на модели взаимного спектра в форме (1), зачастую приводит к противоречивым результатам, особенно в области высоких частот. Именно это и произошло при обработке данных эксперимента на Автономной морской лаборатории.

В результате, для анализа разрешающей способности и корректировки турбулентных спектров нами использована двухпараметрическая модель взаимного спектра, разработанная А.В Смольяковым [12]. Двухпараметрическая модель взаимного спектра имеет следующий вид:

$$\gamma(\xi_1, \xi_3, \omega) = h|\gamma_0| \exp(i\xi_1 \omega / U_c) - (h-1) \Delta\gamma | \exp(im_1 \xi_1 \omega / U_c) \quad (2)$$

где

$$|\gamma_0| = \exp \left[-A \sqrt{(\omega \xi_1 / U_c)^2 + (m_0 \omega \xi_3 / U_c)^2} \right]$$

$$|\Delta \gamma| = \exp \left\{ -\sqrt{(m_1 G / n) \left[(\omega \xi_1 / U_c)^2 + (\omega \xi_3 / U_c)^2 \right]} \right\} \quad n = 1.005$$

$$A = 0.124 \sqrt{1 - 0.2U / \omega \delta^* + (0.2U / \omega \delta^*)^2}; \quad G = 1 + A^2 - 1.005 m_1;$$

$$m_1 = (A^2 + 1) / (A^2 + 0.025); \quad h = \left[1 - m_1 A / (m_0 \sqrt{G}) \right]^{-1}$$

Корректировочные функции турбулентных спектров показаны на рис. 6 в форме $\Delta = 10 \lg P_m(\omega) / P(\omega)$, где $P_m(\omega)$ измеренный (искаженный) спектр, $P(\omega)$ истинный спектр; $\omega = 2\pi df / U_\phi$, где d - диаметр преобразователя.

4. Корректировка турбулентных спектров

Результаты анализа разрешающей способности, представленные на рис. 6, показывают, что использование для корректировки спектров мощности двухпараметрической модели (2) взаимного спектра кардинальным образом меняет форму корректировочной функции (кривая 2 на рис. 6) - по сравнению с корректировочной функцией, основанной на использовании однопараметрической модели (1) взаимного спектра (кривая 1 на рис. 6). Теперь корректировочная функция, во-первых, прогнозирует более сильные искажения спектра мощности. Во-вторых, и это - самое главное, корректировочная функция при увеличении частоты спадает не монотонно, а с некоторыми флуктуациями (с перегибами).

Полученный результат позволяет понять возникновение перегибов измеренных турбулентных спектров на высоких частотах. С физической точки зрения это объясняется тем, что распределение энергии по волновым числам в частотно-волновом пространстве для модели взаимного спектра (2) получается более компактным, чем для модели (1). Более компактное распределение энергии по волновым числам эквивалентно большей степени «замороженности» поля турбулентных давлений, и, соответственно, кривая корректировочной функции имеет более резко выраженные экстремумы.

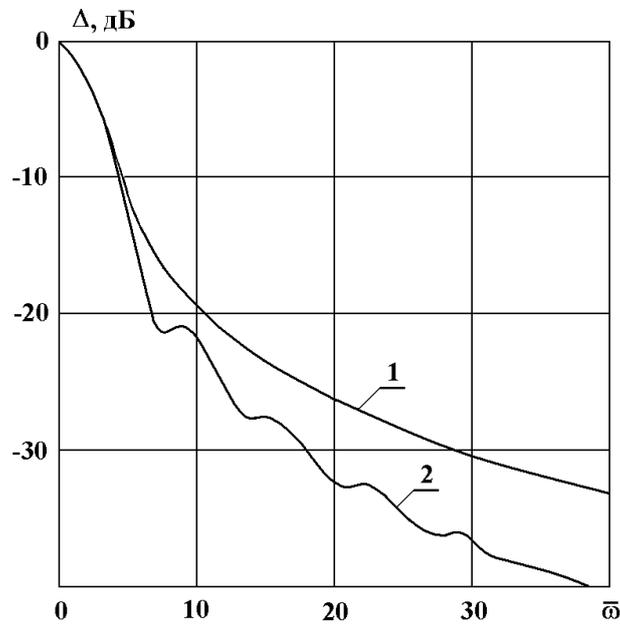


Рис.6. Корректировочные функции турбулентных спектров.

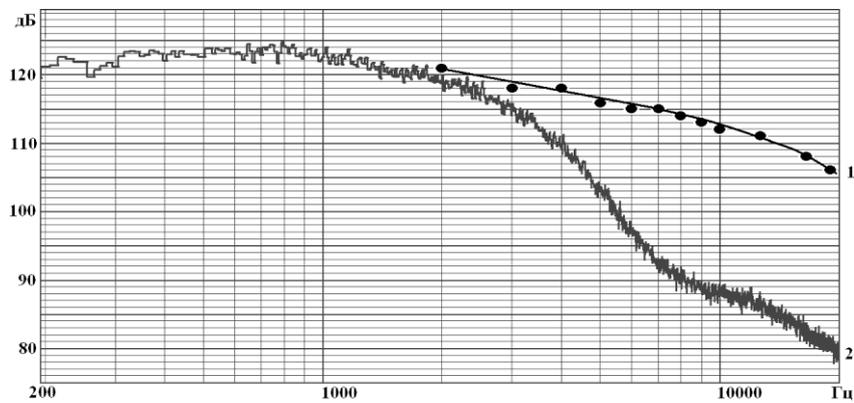


Рис 7. Измеренный и откорректированный турбулентные спектры. 1-откорректированный спектр; 2-измеренный спектр.

Представим далее результаты анализа экспериментальных данных. На рисунке 7 приведен усредненный по ряду реализаций спектр мощности турбулентных пульсаций давления, измеренный в одной из точек измерительной секции Всплывающего

устройства, на скорости всплытия 22 м/сек преобразователем диаметром 1,3 мм. Усредненный измеренный спектр был откорректирован на влияние размера преобразователя. При корректировке спектров мы использовали корректировочную функцию, построенную по модели взаимного спектра (2). Отметим, что аналогичный вид имеют откорректированные турбулентные спектры, измеренные при других скоростях всплытия и при использовании протяженных преобразователей давления диаметром 20мм. Результаты корректировки, представленные на рисунке 7, показывают, что использование корректировочной функции, построенной с помощью двухпараметрической модели взаимного спектра, позволило получить для истинных (откорректированных) частотных спектров турбулентных пульсаций давления монотонный (без перегибов) спад спектральных уровней на высоких частотах.

5. Заключение

1. Создана Автономная морская лаборатория для экспериментальных исследований шумов обтекания в глубоком море, что дает возможность проводить сложный акустико-гидродинамический эксперимент в турбулентном пограничном слое при высоких числах Рейнольдса (до значений 10^8) в автономных условиях, без вмешательства оператора, практически не искаженный посторонними помехами.

2. При всплытии устройства с глубины 200 м в широком диапазоне частот проведено экспериментальное исследование спектров мощности и взаимных спектров турбулентных пульсаций давления. В наших экспериментах удалось расширить диапазон измерения турбулентных шумов обтекания до 80 КГц.

3. Были обнаружены неожиданные особенности поведения спектров (их перегибы) в высокочастотной области спектра. Исследована разрешающая способность регистрации турбулентного шума после применения двухпараметрической модели взаимного спектра турбулентных пульсаций давления. Это позволило устранить приполнение высокочастотной области спектра. Получен монотонный (без перегибов) спад спектральных уровней на высоких частотах. Тем самым, обеспечен точный результат при оценке турбулентных спектров шумов обтекания на

высоких частотах на поверхности антенны преобразователей, имеющих непосредственный контакт с набегающим потоком.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-90300 Абх_а).

Литература

1. Haddle G. and Skudrzyk E. // J. Acoust. Soc. Amer. 1969. V.46. pp. 130- 157.
2. Смольяков А.В., Ткаченко В.М.. Измерения турбулентных пульсаций - Л.: Энергия, 1980. 263 с.
3. W.K. Blake Mechanics of Flow induced Sound and Vibration Volume II Complex Flow-Structure Interactions. 1986, New York, Academic Press.
4. Смольяков А.В. Шум турбулентных потоков. - СПб: ЦНИИ им. А.Н. Крылова, 2005. 312 с.
5. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. Турбулентные пристеночные пульсации давления - М.: Научный мир, 2007. 223 с.
6. Willmarth W.W. // Annual Review of Fluid Mechanics. 1975. V.7. pp. 13-38.
7. Кудашев Е.Б. // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 488 -499.
8. Кудашев Е.Б., Колышницын В.А., Маршов В.П., Ткаченко В.М. // Акуст. журн. 2013. Т.59. № 2. С. 211-221.
9. Кудашев Е.Б., Колышницын В.А, Маршов В.П. Акустика океана. Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. С. 193-198. - М.:ГЕОС, 2013.
10. Кудашев Е.Б., Колышницын В.А, Маршов В.П. // Intern. Conf. Turbulence and Wave Processes. 2013. Abstracts, pp. 131 - 133. М.: INTUIT.RU Ltd, 2013.
11. Corcos G.M. // J. Acoust. Soc. Amer. 1963. V.35, № 1. pp.192-199.
12. Смольяков А.В. // Акуст. журн., 2006, Т.52, № 3, С.393-400.