

УДК 534.26

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО МОРЯ

Е.Б. Кудашев, Г.В. Кенигсбергер

Аннотация

Для проведения экспериментальных исследований гидродинамических шумов обтекания в Черном море на Сухумской акватории Гидрофизического института Академии наук Абхазии создан морской полунатурный стенд. Для изучения пристеночных турбулентных давлений развит новый метод исследования статистических характеристик турбулентных пульсаций давления в условиях глубокого моря, основанный на применении всплывающих устройств. Принципы, реализованные при их создании, позволяют осуществлять 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.

Ключевые слова: гидродинамические шумы обтекания, всплывающее устройство, акустико-гидродинамический эксперимент, пристеночные турбулентные давления.

Введение

Проблема определения статистических параметров пульсаций давления в турбулентных потоках, генерирующих шумы обтекания, первоначально возникла около 60 лет назад в связи с появившейся необходимостью уменьшения уровней интенсивного шума, который производят турбулентные газовые струи при истечении из сопел реактивных двигателей самолетов. Несколько позже эта проблема получила свое дальнейшее развитие применительно к шуму обтекания многих других объектов и аппаратов, движущихся в воде и воздухе с большими скоростями. Изучением этой проблемы занимается относительно молодая наука, которую часто называют гидродинамической или аэродинамической акустикой и которая сформировалась на границе двух самостоятельных разделов механики сплошных сред: гидродинамики (аэродинамики) и акустики [1–4].

Аэрогидродинамическая акустика использует статистические параметры турбулентных потоков как исходный фундамент для статистического описания процессов генерации акустического излучения и формирования псевдозвуковых турбулентных давлений. Псевдозвуковые флуктуации давления имеют не акустическую, а гидродинамическую природу, чем и обусловлено их название, впервые введенное в обращение академиком Д.И. Блохинцевым. Псевдозвуковые давления не генерируют акустического излучения непосредственно, так как их волновые числа меньше звуковых волновых чисел, но возбуждают вибрации корпусных конструкций объектов и аппаратов, обтекаемых потоком, что приводит к возникновению вторичного шума обтекания, переизлученного вибрациями.

Проблема генерации шума турбулентными потоками считается одной из наиболее трудных проблем нелинейной механики жидких и газообразных сред. Основные трудности теоретического изучения проблемы обусловлены тем, что для ее математического описания используются сложные нелинейные дифференциальные

уравнения в частных производных, статистическая форма которых образует незамкнутую систему уравнений (число неизвестных больше числа уравнений). Незамкнутость системы делает неизбежным привлечение опытных данных. Однако при экспериментальном изучении проблемы возникают трудности, одна из которых состоит в том, что лабораторные экспериментальные установки (аэродинамические и гидродинамические трубы, гидрлотки, бассейны для опытов) для создания потока используют различного рода механизмы, которые производят посторонние шумы, мешающие измерениям шумов обтекания. Другая принципиальная трудность экспериментального моделирования турбулентных шумов обтекания заключается в том, что в лабораторных условиях не удается обеспечить такие большие числа Рейнольдса, которые представляли бы практический интерес.

Экспериментальные исследования турбулентных шумов обтекания, проводимые нами в Сухумской акватории Черного моря, позволяют развить актуальное научное направление в области гидродинамической акустики и получить новые научные результаты по определению турбулентных источников гидродинамических помех работе гидроакустических средств на гидрографических, научно-исследовательских и промысловых судах.

Турбулентные источники шумов обтекания – пристеночные пульсации давления – занимают особое место в фундаментальных и прикладных исследованиях турбулентных течений. С одной стороны, пристеночные турбулентные пульсации давления уже в силу своего определения представляют лишь граничные характеристики турбулентного течения, являясь своего рода «тенью» или проекцией сложных динамических процессов, происходящих в ядре потока. С другой стороны, существует важная специфика экспериментальных исследований пристеночных турбулентных давлений, связанная с возможностью использования протяженных приемников с различными пространственно-временными свойствами, не оказывающих обратного влияния на изучаемый поток. Данная возможность определяет уникальный методический потенциал экспериментальных исследований полей турбулентных пристеночных пульсаций давления применительно к проблеме детального количественного изучения пространственной статистической структуры пристеночной турбулентности.

Прикладное значение исследований турбулентных пульсаций давления особенно велико. Поля пульсационной компоненты пристеночных давлений являются определяющим фактором вибрационного нагружения обтекаемых тел в стационарном турбулентном потоке. Пульсационное силовое взаимодействие потока и ограничивающих его элементов порождает акустическое излучение в область течения, а вызванные турбулентной нагрузкой вибрации, будучи сами по себе фактором, важным в инженерных приложениях, служат дополнительным механизмом излучения и переизлучения звука, порождаемого за счет пульсаций пристеночного давления.

1. Морской полунатурный стенд. Всплывающее устройство

Несколько десятилетий назад в США научной группой Скучика [5, 6] и практически одновременно в СССР (ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и в наших работах) [7, 8] были начаты исследования по созданию всплывающих устройств.

Всплывающее устройство (ВУ) представляет собой удлиненное тело вращения, имеющее в погруженном состоянии избыточную архимедову плавучесть и по этой причине способное самостоятельно всплывать из глубоководных частей морской акватории, куда оно предварительно доставляется с помощью специальных заглубляющих приспособлений. В тот ранний период был предложен и экспериментально

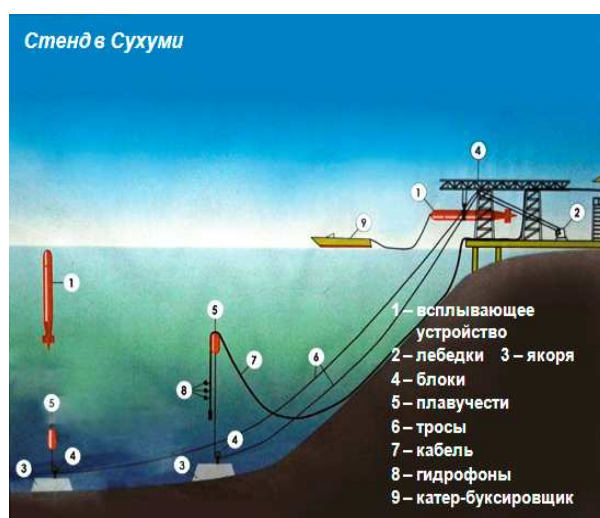


Рис. 1. Структура морского полунатурного стенда

разработан новый метод изучения пристеночных турбулентных давлений, основанный на применении ВУ, был спроектирован и изготовлен экспериментальный вариант такого устройства.

Принципы, реализованные при создании ВУ, представляют значительный интерес, так как позволяют осуществлять 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.

В Сухумской бухте в акватории Гидрофизического института Академии наук Абхазии существуют подходящие условия для проведения экспериментальных исследований в области гидроакустики и гидродинамической акустики. Акватория Гидрофизического института расположена в северо-западной части Черного моря к югу от Сухумского маяка и представляет собой глубоководный участок моря размером 2 мили \times 3 мили, ограниченный с севера береговой чертой далеко выступающего в море Сухумского мыса. Уровень моря у берега на 28 см ниже нуля Кронштадтского футштока. Наклон дна по направлению от берега составляет в среднем 28° .

Структура морского полунатурного стенда, созданного на основе ВУ, представлена на рис. 1. В состав морского стенда входят: ВУ с регулируемой положительной плавучестью и аппаратурой для измерения гидродинамических шумов; эллинг для хранения и сборки ВУ; катер для буксировки ВУ к месту заглубления; эстакада (пирс) для транспортировки ВУ из эллинга в море и обратно; береговые лебедки; якоря, оснащенные донными блоками. Положительная плавучесть технологического буя остается неизменной и равной 1.0 т, вес металлического якоря может составлять 2.0 т.

Была выполнена буксировка морских плавучестей технологического буя в район экспериментов с использованием сейнера, на котором установлен автокран грузоподъемностью 12 т для подъема донного якоря. Прошли систематические испытания и начаты экспериментальные исследования гидродинамических шумов обтекания на морском полунатурном стенде в Сухумской акватории [9].

Высокая скорость движения стенда относительно воды достигается исключительно за счет избыточной силы плавучести, действующей на ВУ при всплытии

с большой глубины. Стенд представляет собой удлиненное тело вращения с обтекаемой носовой частью и кольцевым стабилизатором в его кормовой части. Фактически стенд – автономная лаборатория, оснащенная датчиками турбулентных пульсаций давления. Основные параметры созданного ВУ: длина (в зависимости от варианта сборки) 6–14 м; диаметр цилиндрической части – 0.65 м; скорость на участке установившегося движения – 5–25 м/с.

Режим течения в пограничном слое ВУ практически на всей его длине является турбулентным, с градиентом среднего давления, равным нулю. Основное внимание в создании ВУ было сосредоточено на моделировании интегральных кинематических и динамических характеристик пограничных слоев на корпусах судов, морских геофизических антенн и экспериментальном определении характеристик турбулентной составляющей гидродинамических источников помехи. Были созданы и испытаны уникальные образцы ВУ, способные эффективно работать в море при всплытии с глубин до 200 м и скоростях до 25 м/с.

Рабочий участок всплытия с постоянной скоростью всплытия составлял более 80 м. Максимальная скорость всплытия ВУ изменялась от 5 до 25 м/с. Времени установившегося движения с заданной глубины достаточно для надежного анализа турбулентных пульсаций давления в диапазоне частот 0.2–50 КГц.

В качестве чувствительных элементов турбулентных пульсаций давления были использованы пьезокерамические преобразователи давления. Диаметр чувствительной поверхности преобразователя равен 16 мм.

Исследования турбулентных пульсаций давления актуальны в связи с проблемой шумов обтекания скоростных транспортных средств и снижения уровней турбулентных помех работе корабельных гидроакустических систем. Работы на ВУ перспективны в настоящее время в связи с исследованием источников гидродинамических помех работе гидроакустических средств.

2. Основные результаты

Для проведения исследований создана береговая эстакада, выполнена наладка тросовой дороги, обеспечивающей заглубливание ВУ на заданную глубину. Выполнены морские постановки с якорями, оснащенными донными блоками. Завершением эксперимента является момент выхода ВУ над поверхностью моря.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных измерений спектров мощности турбулентных пульсаций давления в малошумной аэродинамической трубе ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Эксперимент был выполнен для оценки способности измерительного тракта ВУ адекватно регистрировать турбулентные пульсации давления [9]. Малошумная аэродинамическая труба разомкнутого типа с закрытым рабочим участком имеет низкий уровень собственного шума и малую степень турбулентности свободного потока. На стенке рабочего участка в непосредственной близости друг от друга вдоль направления однородности потока устанавливались преобразователи пульсаций давления с диаметром 16 мм измерительного тракта ВУ и миниатюрные преобразователи измерительной системы аэродинамической трубы с диаметром чувствительной поверхности 1.3 мм. Чувствительная поверхность преобразователей выставлялась заподлицо с внутренней (со стороны потока) поверхности стенки рабочего участка аэродинамической трубы.

Верхняя граница частотного диапазона спектра турбулентных давлений 1250 Гц, зарегистрированная измерительным трактом ВУ, определялась низкой разрешающей способностью преобразователей с диаметром 16 мм к высокочастотным мелкомасштабным турбулентным пульсациям давления. Этот эффект обусловлен осреднением мелкомасштабных компонент турбулентных пульсаций по площади чувствительной поверхности преобразователя.

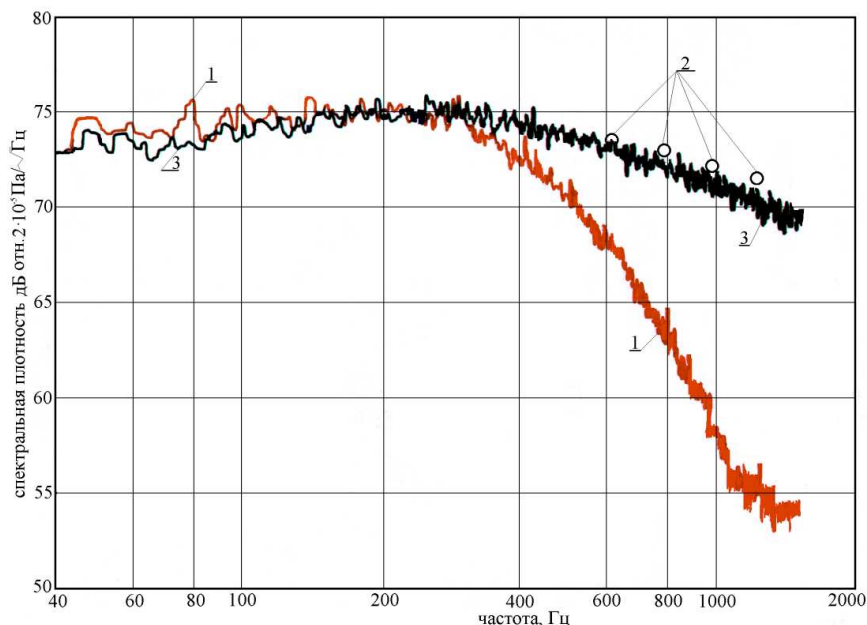


Рис. 2. Экспериментальные исследования спектров мощности турбулентных пульсаций давления. Измерения спектров выполнены в малозумной аэродинамической трубе: 1 – измерительный тракт ВУ (диаметр чувствительной поверхности преобразователей турбулентных давлений 16 мм); 2 – результат корректировки низкой разрешающей способностью преобразователей к высокочастотным мелкомасштабным турбулентным пульсациям давления; 3 – измерительная система аэродинамической трубы с датчиками пульсаций давления диаметром чувствительной поверхности 1.3 мм

3. Обработка экспериментальных данных

Остановимся подробнее на математическом аспекте эффекта осреднения мелкомасштабных компонент турбулентных пульсаций, получившего название разрешающей способности датчиков турбулентных пульсаций.

Известно, что регистрация турбулентных пульсаций давления будет осуществляться без искажения только в том случае, если выполняется условие: размеры чувствительной области преобразователя давления (датчика турбулентных пульсаций) должны быть меньше самых мелкомасштабных компонент турбулентного поля. В силу особенностей турбулентного движения жидкости поле пульсаций любой турбулентной величины содержит набор пространственных неоднородностей, размеры которых лежат в очень широких границах. Однако очевидно, что чувствительная область преобразователя давления имеет конечные размеры, и пространственные компоненты поля, размеры которых меньше размеров чувствительной области преобразователя, будут преобразователем осредняться. Это приводит к тому, что вклад мелкомасштабных пульсаций давления в выходной сигнал преобразователя турбулентных давлений будет уменьшаться. Этот эффект удается учесть, если построена корректировочная функция измеряемого параметра, определяющая отношение ее измеренного значения $\varphi_m(x)$ к истинному $\varphi(x)$:

$$\chi_\varphi(x) = \varphi_m(x)/\varphi(x). \quad (1)$$

В настоящее время соотношение между размерами преобразователей, используемых для измерений турбулентных пульсационных величин, и характерными масштабами течения в экспериментальных установках таковы, что результат измерения (1) неизбежно содержит погрешность, вызванную конечностью размеров чувствительной области преобразователя.

Учет влияния конечных размеров преобразователя (датчика пульсаций) представляет значительные трудности. После того, как Коркос продемонстрировал в пионерской работе [10] принципиальную возможность введения поправки на конечные размеры приемной поверхности преобразователя, усилиями различных авторов была развита теория разрешающей способности датчиков турбулентных пульсаций в поле турбулентных давлений [7, 8, 11], устанавливающая связь между статистическими характеристиками исходного турбулентного поля давлений и их измеренными значениями. Приведем основные соотношения теории разрешающей способности датчиков турбулентных пульсаций и результаты корректировки экспериментальных данных исследования турбулентных пульсаций давления на ВУ, выполненные на основе теории разрешающей способности.

В самом общем случае выходной сигнал $\varphi_m(x)$ преобразователя (измеренная величина) связан с воздействием на входе системы $\varphi(x)$ (которое рассматривается как неискаженное, «истинное» значение измеряемой величины) следующим соотношением:

$$\varphi_m(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x, x') \varphi(x') dx'. \quad (2)$$

В (2) весовой множитель $h(x, x')$ под знаком интеграла характеризует свойства измерительного преобразователя. В приложениях, желая подчеркнуть связь этой функции с прибором, производящим измерение, $h(x, x')$ называют аппаратной функцией, или импульсной переходной характеристикой системы.

Для преобразователя турбулентных пульсаций давления аппаратная функция $h(x, x')$ в (2) имеет физический смысл функции распределения чувствительности по поверхности датчика. Применительно к полю пульсаций давления Коркос [10] предложил форму корректировки измеренного частотного спектра турбулентных пульсаций давления $P_m(\omega)$, связанного с неискаженным значением взаимного спектра $P(\varepsilon, \omega)$ соотношением

$$\chi_p(\omega) = \frac{p_m(\omega)}{p(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\varepsilon) \gamma(\varepsilon, \omega) d\varepsilon, \quad (3)$$

где $\gamma(\varepsilon, \omega)$ – безразмерный взаимный спектр турбулентных давлений,

$$\Theta(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) h(x + \varepsilon) dx \quad (4)$$

является статистической функцией влияния преобразователя, $\Theta(\varepsilon)$ есть свертка функций распределения чувствительности преобразователя $h(x)$.

Как показано в работах автора [8, 11], для определения статистической функции влияния $\Theta(\varepsilon)$ согласно (4) необходимо предварительно экспериментально исследовать форму распределения чувствительности преобразователя $h(x)$, используемого в эксперименте. Для учета влияния размера чувствительной поверхности преобразователя на искажение спектров пульсаций давления на высоких частотах необходимо выполнить процедуру вычисления корректировочной функции (3), опираясь

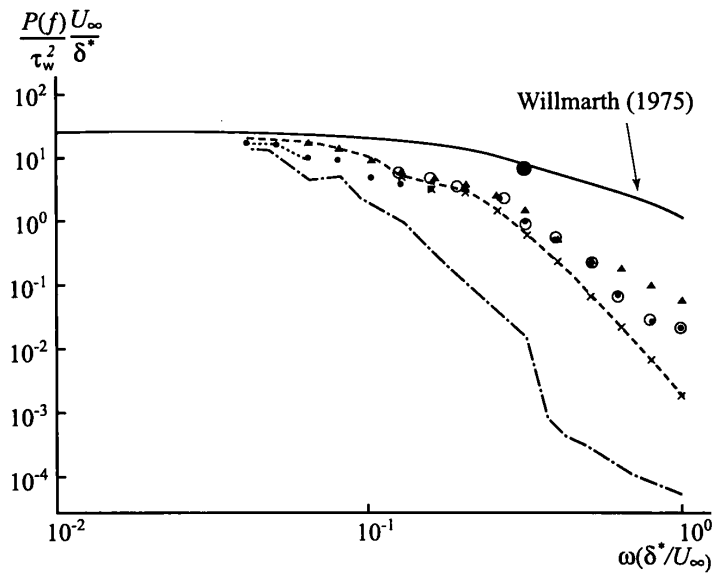


Рис. 3. Влияние размеров чувствительной поверхности приемника на регистрацию спектров шумов обтекания при совпадающей скорости всплывания 20 м/с. Приемник диаметром 20 мм: “-.-” – без учета влияния размеров; о – после внесения поправки. Приемник диаметром 3 мм: “-.-+” – без учета влияния размеров приемника; ▲ – после внесения поправки. Сплошная кривая – результаты измерения спектров пульсаций давления на плоской пластине

на соотношения (1), (2). Помимо определения статистической функции влияния (4) преобразователя $\Theta(\varepsilon)$ требуется адекватно выбрать модель взаимного спектра турбулентных давлений $\gamma(\varepsilon, \omega)$. В качестве рабочей модели поля турбулентных пристеночных давлений примем здесь схему Коркоса [10]. Количественные результаты корректировки экспериментальных данных исследования турбулентных пульсаций на ВУ, основанные на изложенном выше анализе пространственного разрешения преобразователей турбулентных давлений, представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 видно, что после введения поправки на размер чувствительной поверхности преобразователей турбулентных давлений достигается хорошее совпадение уровней спектральной плотности турбулентных пульсаций давления, регистрируемых преобразователями пульсаций давления с диаметром 16 мм измерительного тракта ВУ и миниатюрными преобразователями измерительной системы аэродинамической трубы с диаметром чувствительной поверхности 1.3 мм. Однако необходимо отметить, что к звуковому давлению в воде высокая разрешающая способность этих преобразователей сохраняется до частот, превышающих 40 кГц.

Рассмотренный эффект искажения спектров турбулентных пульсаций давления иллюстрируют результаты эксперимента на ВУ, представленные на рис. 3 [9, 11]. Нормированные значения спектральных уровней турбулентной составляющей гидродинамических источников помех (турбулентных пульсаций давления), действующих со стороны пограничного слоя на приемную поверхность гидроакустической антенны, измерены датчиками с диаметром 3 мм (пунктирная кривая) и 20 мм (штрих-пунктирная кривая). После корректировки экспериментальных данных (введения поправки на размер преобразователей) достигается совпадение уровней спектральной плотности турбулентных пульсаций давления, регистрируемых миниатюрными датчиками диаметром 3 мм и протяженными преобразовате-

лями диаметром 20 мм. Здесь же для сравнения с результатами измерения спектров пульсаций давления на плоской пластине в виде сплошной кривой показан эталонный частотный спектр Виллмарта [12]. Можно сделать вывод о более резком спаде шумов обтекания на высоких частотах в турбулентном пограничном слое на ВУ по сравнению с универсальным спектром турбулентных давлений на пластине.

Заключение

На экспериментальной базе Гидрофизического института Академии наук Абхазии в Сухумской акватории Черного моря восстановлен морской полунатурный стенд и модернизированы всплывающее устройство и береговое оборудование. Для проведения экспериментальных исследований гидродинамических шумов обтекания создана береговая эстакада, выполнены наладка тросовой дороги, обеспечивающей заглубление всплывающего устройства на заданную глубину, и морские постановки с якорями, оснащенными донными блоками. Проведены систематические испытания ВУ и начаты экспериментальные исследования гидродинамических шумов обтекания. В рассмотренной постановке и в таком объеме экспериментальные измерения гидродинамических шумов обтекания при высоких числах Рейнольдса проведены впервые в мировой практике.

Экспериментальные исследования турбулентных давлений в условиях глубокого моря на ВУ кардинально расширили возможности изучения турбулентных источников гидродинамических помех работе гидроакустических средств на гидрографических, научно-исследовательских и промысловых судах. Выполнен анализ пространственного разрешения преобразователей турбулентных давлений. Обработка экспериментальных данных, полученных при проведении измерений частотных спектров гидродинамических шумов обтекания на ВУ, после введения поправки на размер чувствительной поверхности преобразователей турбулентных давлений повысила точность и информативность исследования поля турбулентных пульсаций давления на поверхности приемных элементов гидроакустических систем.

Summary

E.B. Kudashev, G.V. Kenigsberger. Experimental Studies of Turbulent Pressure Fluctuations in the Deep Sea.

Wall pressure fluctuations in turbulent boundary layers play an important role in acoustic measurements carried out in moving media. For conducting experimental research on hydrodynamic flow noise in the Black Sea, a marine simulation system has been created in the Sukhumi water area of the Hydrophysical Institute of the Academy of Sciences of Abkhazia. A new method has been developed to study turbulent wall pressures by analyzing statistical characteristics of turbulent pressure fluctuations in the conditions of the deep sea. This method is based on using floating devices. The principles of their construction make it possible to carry out complex acoustic-hydrodynamic experiments in turbulent boundary layers at high (up to 10^8) Reynolds numbers in standalone environments with no operator and practically no interference of extraneous noises.

Key words: hydrodynamic flow noise, floating device, acoustic-hydrodynamic experiment, turbulent wall pressure.

Литература

1. *Bull M.K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: some reflections of forty years of research // *J. Sound Vibr.* – 1996. – V. 190, No 3. – P. 299–315.

2. *Смольяков А.В.* Шум турбулентных потоков. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. – 312 с.
3. *Blake W.K.* Mechanics of flow-induced sound and vibration. – N. Y.: Acad. Press, 1986. – 974 p.
4. *Власов В.Е., Гиневский А.С., Ефимцов Б.М. и др.* Основные проблемы аэроакустики // Труды ЦАГИ. – 1996. – Вып. 2614. – 56 с.
5. *Huddle G., Skudrzyk E.* Flow noise, theory and experiment // Underwater Acoustics / Ed. by V.M. Albers. – N. Y.: Plenum Press, 1963.
6. *Huddle G., Skudrzyk E.* The physics of flow noise // J. Acoust. Soc. Amer. – 1969. – V. 46. – P. 130–157.
7. *Смольяков А.В., Ткаченко В.М.* Измерения турбулентных пульсаций. – Л.: Энергия, 1980. – 263 с.
8. *Кудашев Е.Б.* Экспериментальные исследования шумов обтекания на всплывающем устройстве // Акуст. журн. – 2005. – Т. 51, № 4. – С. 488–499.
9. *Кудашев Е.Б., Маршов В.П., Смольяков А.В., Ткаченко В.М.* Автономная лаборатория в форме цилиндрического тела переменного удлинения для исследования турбулентных пульсаций давления в условиях глубокого моря // Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления. Всерос. науч. конф., посвящ. 75-летию со дня рожд. акад. В.П. Мясникова. Сб. докл. – Владивосток: Ин-т автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 2011. – С. 352–357.
10. *Corcos G.M.* Resolution of pressure in turbulence // J. Acoust. Soc. Amer. – 1963. – V. 35, No 2. – P. 192–199.
11. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пристеночные пульсации давления. – М.: Науч. мир, 2007. – 223 с.
12. *Willmarth W.W.* Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1975. – V. 7. – P. 13–38.

Поступила в редакцию
25.01.12

Кудашев Ефим Борисович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН; профессор механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

E-mail: kudashev@iki.rssi.ru

Кенигсбергер Генрих Викторович – заместитель директора по научной работе Гидрофизического института Академии наук Абхазии, г. Сухум.

E-mail: kenigsbergger@mail.ru