

УДК 534. 522

РЕГИСТРАЦИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ПРИСТЕНОЧНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДАВЛЕНИЙ НА ФОНЕ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

© 2020 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: kudashev@iki.rssi.ru

**e-mail: yablonik@gmail.com

Поступила в редакцию 25.01.2020 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 28.04.2020 г.

Рассматривается задача регистрации спектральных компонент частотного спектра пристеночных турбулентных давлений в условиях воздействия акустических шумов. Предложенный ранее метод измерений пульсаций давления на фоне акустических помех основан на использовании двухэлементного преобразователя давлений, осуществляющего волновую фильтрацию измеряемого поля турбулентных пульсаций. В работе аналитически исследованы волновые свойства двухэлементного преобразователя в поле турбулентных давлений. Показано, что при надлежащем выборе характеристик предлагаемый приемник пульсаций давления в силу своих волновых свойств способен отсекаать вклад акустической помехи в результаты измерений. Установлены параметры и соотношения, определяющие условия эффективности подавления акустической помехи.

Ключевые слова: пристеночные пульсации давления, шумы обтекания, частотно-волновые спектры, акустические помехи, волновая фильтрация пульсаций давления

DOI: 10.31857/S032079192005007X

ВВЕДЕНИЕ

Исследования взаимодействия турбулентного потока с обтекаемыми структурами, возбуждение потоком вибраций в структурах и генерация шумов обтекания, начатые более 50 лет назад, остаются актуальной исследовательской проблемой, получившей свое развитие применительно к шуму обтекания многих объектов и аппаратов, движущихся в воде и воздухе с большими скоростями. Акустика турбулентных потоков использует статистические параметры турбулентных полей скорости и давления как исходный фундамент для статистического описания процессов аэрогидродинамической генерации акустического излучения и формирования полей пристеночных турбулентных давлений. Наиболее полно сложившиеся за десятилетия исследований подходы и представления в данной области рассматриваются в обзорах [1–3] и в монографиях [4–6].

Турбулентные пульсации давления играют ключевую роль в приложениях, связанных с нестационарным динамическим взаимодействием турбулентного потока и обтекаемых структур. Пристеночные пульсации давления возбуждают вибрации элементов конструкций и генерируют

гидродинамические шумы обтекания. Взаимодействие турбулентных потоков и обтекаемых структур представляет значительный интерес в широком диапазоне прикладных задач акустики турбулентных потоков [3, 7–10]: прежде всего, в задачах прогноза и управления аэрогидродинамическим возбуждением колебаний элементов конструкций, в частности, корпусов самолетов, подводных лодок, высокоскоростных автомобилей и других транспортных средств.

При экспериментальном изучении пространственно-временной структуры поля пристеночных турбулентных пульсаций давления одна из основных трудностей состоит в том, что лабораторные экспериментальные установки (аэродинамические и гидродинамические трубы, гидроточки, опытовые бассейны) для создания турбулентного потока используют различного рода механизмы, создающие посторонние акустические шумы.

В обычных установках электромеханические агрегаты, элементы арматуры, обеспечивающие требуемый режим потока воды или воздуха в гидро- и аэродинамических трубах и установках, движение буксировочной тележки в бассейнах и др. —

неизбежно являются источниками шума, т. е. звуковых пульсаций давления. Если не приняты специальные меры, фоновый уровень акустических пульсаций давления в таких установках способен повлиять на корректность регистрации турбулентных пристеночных давлений, обусловленных непосредственно исследуемым потоком. В этих условиях внешний шум представляет собой акустическую помеху регистрации спектральных компонент турбулентных пульсаций давления. Один из методов подавления этой помехи состоит в использовании компенсированных по шуму приемников-преобразователей турбулентных пульсаций давления.

ШУМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ ПРИЕМНИК ТУРБУЛЕНТНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Метод регистрации турбулентных пульсаций давления в присутствии акустической шумовой помехи использует зависимость характеристик пространственной фильтрации от протяженности чувствительной поверхности преобразователя. Поля пристеночных турбулентных давлений и звуковых волн имеют обычно существенно различные линейные масштабы. Суть общего метода в данном случае сводится к тому, что компенсирующий элемент реагирует лишь на поле создающего помеху параметра, формируя электрический сигнал, идентичный сигналу-помехе основного (рабочего) чувствительного элемента измерительного преобразователя. При встречном подключении основного и компенсирующего элементов происходит электрическое вычитание помехи.

Рассматриваемый шумокомпенсированный приемник состоит из двух чувствительных элементов. Первый — миниатюрный чувствительный элемент — генерирует сигнал, обусловленный турбулентным воздействием и акустической помехой. Второй (компенсирующий) элемент — протяженный чувствительный элемент — реагирует лишь на акустическое воздействие из-за некогерентного суммирования мелкомасштабных турбулентных пульсаций на его приемной поверхности. При вычитании сигналов миниатюрного и протяженного чувствительных элементов сигнал на выходе приемника оказывается пропорциональным только турбулентным пульсациям давления.

Эти представления были использованы авторами при разработке двухэлементного приемника для регистрации турбулентных пульсаций давления на фоне акустических помех [6, 11–13]. Дальнейшее развитие и разработка метода измерения спектральных компонент турбулентных давлений в условиях воздействия акустических шумов потребовало детального рассмотрения волновых свойств шумокомпенсированного приемника. Результаты исследования волновой фильтра-

ции поля турбулентных давлений представлены в следующих разделах статьи.

ВОЛНОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрим формирование сигнала двухэлементного приемника при измерении турбулентных давлений. Выражение, связывающее частотный спектр $\Phi_{ss}(\omega)$ сигнала на выходе элементарного приемника с полем пульсаций давления $E(\mathbf{k}, \omega)$, определяется общим соотношением теории волновой фильтрации [6]:

$$\Phi_{ss}(\omega) = \int_{\infty} S(\mathbf{k}) E(\mathbf{k}, \omega) d\mathbf{k}, \quad (1)$$

где волновая характеристика приемника

$$S(\mathbf{k}) = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\boldsymbol{\varepsilon}) \exp(i\mathbf{k}\boldsymbol{\varepsilon}) d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

является фурье-образом функции влияния приемника $\Theta(\boldsymbol{\varepsilon})$. Функция влияния определяется выражением

$$\Theta(\boldsymbol{\varepsilon}) = \int_{\infty} \bar{K}(\mathbf{x}) \bar{K}(\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}) d\mathbf{x}, \quad (3)$$

где $\bar{K}(\mathbf{x})$ — импульсная характеристика приемника давления, характеризующая распределение локальной чувствительности по апертуре.

Отметим, что достаточно большим размерам апертуры приемника соответствует волновая характеристика, сосредоточенная в области малых волновых чисел. Реализуя схему вычитания сигналов в двухэлементном приемнике турбулентных давлений, представим сигнал в виде разности сигналов чувствительных элементов 1 и 2 (см. схему на рис. 1):

$$s(t) = \int [\bar{K}_1(\mathbf{x}) - \bar{K}_2(\mathbf{x})] p(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x}, \quad (4)$$

где $p(\mathbf{x}, t)$ — величина пульсационной составляющей давления в момент времени t в точке пространства с координатой \mathbf{x} .

Полагаем интегральные значения чувствительности γ_p первого — основного (миниатюрного) и второго (компенсирующего) чувствительных элементов приемника одинаковыми. Рассмотрим далее двухэлементный приемник с чувствительными элементами с круглой приемной поверхностью. Функции распределения локальной чувствительности $\bar{K}_1(x)$ и $\bar{K}_2(x)$ зададим как

$$\bar{K}_1(x) = \begin{cases} \frac{\gamma_p}{\pi R_1^2} & \text{при } |x| < R_1, \\ 0 & \text{при } |x| \geq R_1, \end{cases} \quad (5)$$

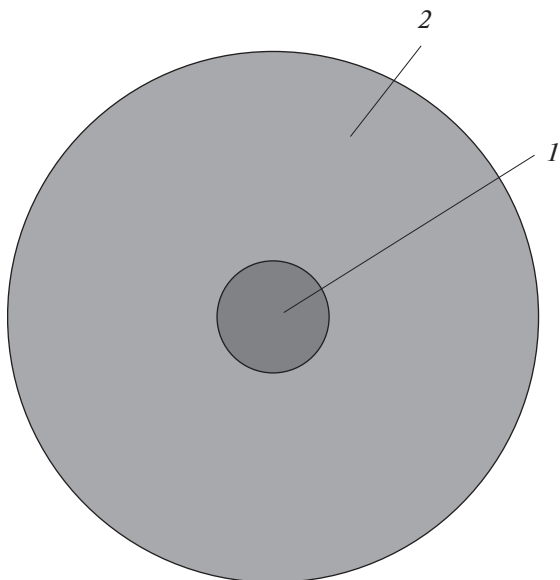


Рис. 1. Схема приемной поверхности шумокompенсированного двухэлементного приемника пристеночных турбулентных давлений. 1 — основной чувствительный элемент; 2 — компенсирующий чувствительный элемент.

$$\bar{K}_2(x) = \begin{cases} \frac{\gamma_p}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} & \text{при } R_1 < |x| < R_2, \\ 0 & \text{при } |x| \geq R_2 \text{ и при } |x| \leq R_1. \end{cases} \quad (6)$$

Выражение (6), рассматривающее компенсирующий преобразователь как кольцо, уточняет ранее использовавшиеся [6] приближенные представления, в которых соотношения для $\bar{K}_1(x)$ и $\bar{K}_2(x)$ имели одинаковый вид, отличаясь лишь индексами радиусов (R_1 и R_2).

Соответствующие (5), (6) значения фурье-образов $K(\mathbf{k})$ функций распределения локальной чувствительности:

$$K_1(\mathbf{k}) = \gamma_p \frac{J_1(\kappa R_1)}{\kappa R_1/2}, \quad (7)$$

$$K_2(\mathbf{k}) = \gamma_p \frac{1}{(1 - \alpha^2)} \left(\alpha \frac{J_1(\kappa R_1/\alpha)}{\kappa R_1/2} - \alpha^2 \frac{J_1(\kappa R_1)}{\kappa R_1/2} \right), \quad (8)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка, $\alpha = R_1/R_2$ — отношение диаметров основного и компенсирующего элементов.

Фурье-образ $K(\mathbf{k})$ распределения локальной чувствительности двухэлементного приемника равен разности волновых образов локальной чувствительности $K_1(\mathbf{k})$ и $K_2(\mathbf{k})$, так что в силу общегоравенства волновой фильтрации

$$S(k) = |K(k)|^2, \quad (9)$$

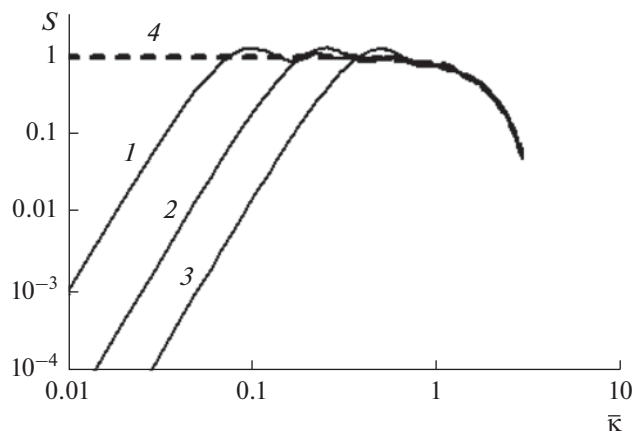


Рис. 2. Волновые характеристики двухэлементного приемника при изменении параметра α — отношения диаметров основного и компенсирующего элементов: 1 — $\alpha = 0.02$; 2 — $\alpha = 0.05$; 3 — $\alpha = 0.1$; 4 — приемник без компенсации.

отнесенная к квадрату интегральной чувствительности волновая характеристика $S(\mathbf{k})$ приемника представляется в виде:

$$S(\bar{\kappa}) = \frac{1}{(1 - \alpha^2)^2} \left(\frac{2J_1(\bar{\kappa})}{\bar{\kappa}} \right)^2 \left(1 - \alpha \frac{J_1(\bar{\kappa}/\alpha)}{J_1(\bar{\kappa})} \right)^2, \quad (10)$$

где $\bar{\kappa} = \kappa R_1$. Поскольку при малых значениях аргумента функция $J_1(x) \approx \frac{x}{2} - \frac{x^3}{16}$, то длинноволновое приближение характеристики (10) может быть представлено в виде

$$S(\bar{\kappa}) \approx \frac{1}{64} \left(\frac{\bar{\kappa}}{\alpha} \right)^4. \quad (11)$$

Вид волновых характеристик приемника — функций $S(\mathbf{k})$, найденных для типовых значений отношения диаметров основного и компенсирующего чувствительных элементов α , равных 0.02, 0.05 и 0.1, показан на рис. 2. Представленные кривые иллюстрируют, в частности, степенную зависимость (11) в зоне малых волновых чисел. Кроме того, демонстрируемые на рис. 2 результаты модельных оценок волновой фильтрации поля турбулентных давлений компенсированным по шуму двухэлементным приемником показывают, что по мере увеличения параметра α (отношение диаметров основного и компенсирующего элементов) возможности подавления акустической низкочастотной помехи возрастают. Однако, при этом снижается волновой диапазон корректного отображения поля турбулентных давлений, связанного с неизменностью волновой характеристики в зоне энергонесущих волновых компонент гидродинамического воздействия.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХИ

Конкретные оценки эффективности подавления акустической помехи выполним применительно к известной двухпараметрической модели Коркоса [14] поля пристеночных пульсаций давления, представляющей волновой спектр $E_f(\kappa)$ в турбулентном пограничном слое. Эта модель, несмотря на дальнейшие модификации [15–17], остается одной из наиболее востребованных в задачах представления полей турбулентных давлений [9, 18, 19].

Согласно модели Коркоса безразмерная спектральная плотность волновых компонент поля давлений на угловой частоте ω представляется в виде

$$E_f(\kappa_u) = \frac{\alpha_c \beta_c}{\pi^2} \frac{1}{[\alpha_c^2 + (\kappa_{1u} - 1)^2][\beta_c^2 + \kappa_{2u}^2]}. \quad (12)$$

Здесь безразмерный вектор $\kappa_u = \kappa U / \omega$ связан с конвективной скоростью U , близкой к скорости обтекания; его компоненты κ_{1u} и κ_{2u} относятся к направлению по потоку и перпендикулярно ему соответственно. Значения входящих в (12) постоянных принимаются равными: $\alpha_c = 0.087$; $\beta_c = 0.55$.

Поскольку волновая характеристика (10) рассматриваемого двухэлементного приемника турбулентных давлений с круглой приемной поверхностью чувствительных элементов зависит лишь от модуля волнового вектора, то при оценке подавления акустического шума нас будет интересовать скалярный волновой спектр $\Phi(\kappa_u)$ турбулентных давлений, характеризующий суммарное по направлениям распределение энергии по волновым числам $\kappa_u = \lfloor \kappa_u \rfloor$.

Скалярный волновой спектр $\Phi(\kappa)$ связан с волновым спектром $E(\kappa)$ простым соотношением:

$$\Phi(\kappa) = \kappa \int_0^{2\pi} E(\kappa \cos \varphi, \kappa \sin \varphi) d\varphi.$$

Соответственно, скалярный волновой спектр $\Phi_f(\kappa_u)$ в рамках рассматриваемой модели поля турбулентных давлений представляется выражением

$$\Phi_f(\kappa_u) = \frac{\alpha_c \beta_c}{\pi^2} \times \kappa_u \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{[\alpha_c^2 + (\kappa_u \cos \varphi - 1)^2][\beta_c^2 + \kappa_u^2 \sin^2 \varphi]}. \quad (13)$$

Интеграл от функции $\Phi_f(\kappa_u)$ по всей области волновых чисел равен единице, т.е. скалярный волновой спектр относится к единичному частотному спектру мощности на частоте ω . Очевидно, что вол-

новое число κ_u связано со значением $\bar{\kappa}$ из (10) посредством безразмерного радиуса $\rho_\omega = R_1 \omega / U$ основного (миниатюрного) чувствительного элемента приемника

$$\frac{\bar{\kappa}}{\kappa_u} = \frac{R_1 \omega}{U} = \rho_\omega. \quad (14)$$

Акустическое поле, рассматриваемое здесь как помеха, сосредоточено в волновой области, удовлетворяющей неравенству $\frac{\kappa C}{\omega} \leq 1$, где C – скорость звука. В рамках представлений о равнонаправленном (диффузном) звуковом поле волновая спектральная плотность E_a акустических пульсаций давления равномерно распределена по указанному диапазону, так что

$$E_a(\kappa_u) = \begin{cases} \frac{K_a}{\pi M^2} & \text{при } \kappa_u \leq M, \\ 0 & \text{при } \kappa_u > M. \end{cases} \quad (15)$$

В равенстве (15) параметр K_a – отношение интегральных по масштабам среднеквадратичных значений акустических пульсаций давления к динамическим на частоте ω ; параметр $M = U/C$ – число Маха обтекающего потока.

Соответственно, ввиду (15), скалярный акустический волновой спектр выражается в форме

$$\Phi_a(\kappa_u) = \begin{cases} \frac{2K_a}{M^2} \kappa_u & \text{при } \kappa_u \leq M, \\ 0 & \text{при } \kappa_u > M. \end{cases} \quad (16)$$

Представленные ниже графические зависимости на рис. 3, основанные на расчетах по приведенным соотношениям, демонстрируют влияние значений безразмерного радиуса основного (миниатюрного) чувствительного элемента ρ_ω и числа Маха M на взаимное расположение волновых характеристик приемника и воздействующих полей турбулентных и акустических пульсаций давления; оно определяет параметры выходного сигнала. Эти зависимости в целом подтверждают ранние оценки [6], но, в отличие от последних, базируются на точных моделях диффузного акустического поля (16) и скалярного турбулентного поля (13) круглым приемником, в состав которого входит кольцевой чувствительный элемент.

Суммарное поле $\Phi(\kappa_u)$, воздействующее на приемник, представляется в виде

$$\Phi(\kappa_u) = \Phi_f(\kappa_u) + \Phi_a(\kappa_u). \quad (17)$$

Приведенные значения измеренных спектральных компонент Φ_m представляются в виде интеграла по волновой области

$$P_m = \int_0^{\infty} \Phi(\kappa) S(\kappa) d\kappa, \quad (18)$$

где характеристика $S(\kappa)$ определяется равенством (10). При этом корректность регистрации спектральных компонент турбулентных пульсаций давления на фоне акустических шумов может оцениваться степенью отклонения величины P_m от единицы.

На рис. 4 показаны результаты моделирования эффективности подавления акустической помехи двухэлементным приемником турбулентных давлений. Представлены значения измеренных спектральных компонент P_m для различных вариантов исполнения приемника, компенсированного по шуму. Выполненные оценки в целом подтверждают представления [6], состоящие в том, что шумозащищенный приемник турбулентных пульсаций давления с отношением α диаметров основного и компенсирующего чувствительных элементов порядка 1 : 20 способен обеспечить при $M < 0.1$ подавление акустической помехи без заметного искажения частотного спектра в безразмерном диапазоне частот $0.2 \leq \omega R_1/U \leq 0.8$. При этом, как показывают выполненные расчеты, существует зависящее от числа Маха оптимальное значение параметра α , обеспечивающее наиболее широкий частотный диапазон эффективного подавления акустического шума.

Как иллюстрируют графические зависимости рис. 4, применительно к значению $M = 0.1$ использование приемника с оптимальным отношением α , составляющим примерно 1 : 30, позволяет подавлять акустический шум с относительным уровнем $K_a = 1$ в диапазоне безразмерных частот 0.1...0.9. При этом увеличение значения α приводит к существенной неравномерности частотной характеристики приемника, а уменьшение – к заметному снижению эффекта подавления акустического шума в зоне высоких частот. Причина состоит в том, что относительно большие величины параметра α приводят к сужению волнового спектрального окна приемника (см. кривую 3 на рис. 3), в то время как чрезмерно малые значения этого параметра с соответствующим расширением волнового спектрального окна способствуют “захвату” волновых компонент акустической помехи на высоких частотах (см. взаимное расположение кривых 2 и 7 на рис. 3).

Необходимо отметить, что представленные оценки относятся к “поршневым” элементам, локальная чувствительность которых неизменна по приемной поверхности. Для практического применения представленного подхода в экспери-

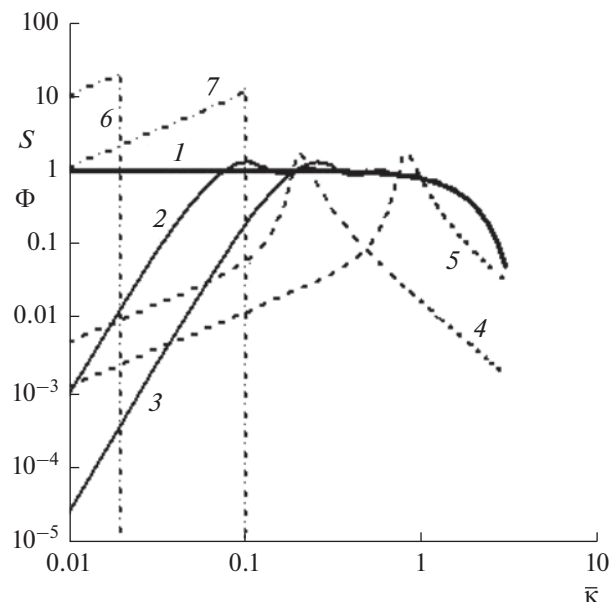


Рис. 3. Волновые характеристики приемника и волновой спектр пульсаций давления. Волновые характеристики: 1 – приемник без компенсации; 2 – шумокompensированный приемник при $\alpha = 0.02$; 3 – шумокompensированный приемник при $\alpha = 0.05$. Волновые спектры: 4 – турбулентный спектр при $\rho_{\omega} = 0.2$; 5 – турбулентный спектр при $\rho_{\omega} = 0.8$; 6 – акустический спектр при $\rho_{\omega} = 0.2$, $M = 0.1$, $K_a = 1$; 7 – акустический спектр при $\rho_{\omega} = 0.8$, $M = 0.15$, $K_a = 1$.

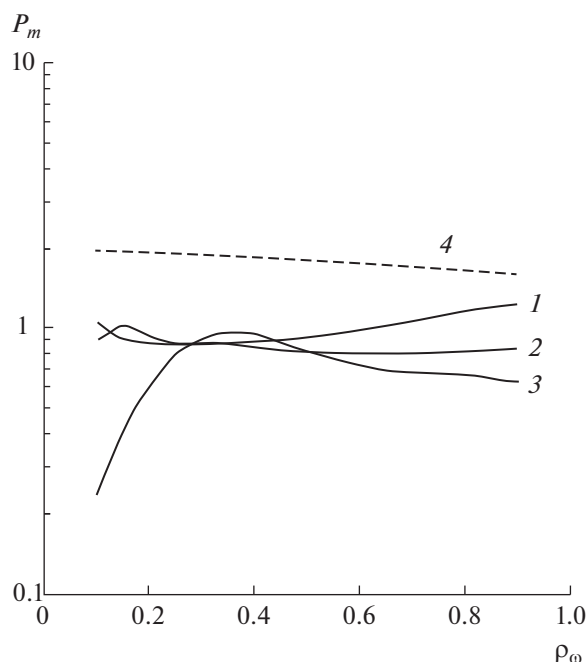


Рис. 4. Эффективность подавления акустической помехи двухэлементным приемником. Частотный спектр турбулентных пульсаций давления при $M = 0.1$; $K_a = 1$; регистрация частотного спектра приемником, компенсированным по шуму: 1 – $\alpha = 0.02$; 2 – $\alpha = 0.03$; 3 – $\alpha = 0.08$. 4 – регистрация спектра некомпенсированным по шуму приемником.

менте необходимо при оценках учитывать реальные распределения чувствительности, которые в значительной мере [6] зависят от конструктивных особенностей преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача подавления акустической компоненты при регистрации пристеночных турбулентных давлений шумокомпенсированным преобразователем, состоящим из двух встречно подключенных элементов одинаковой интегральной чувствительности. Первый (основной) элемент представляет собой круглый приемник относительно небольшого радиуса R_1 , второй (компенсирующий) – кольцевой приемник с граничными радиусами R_1 и $R_2 > R_1$. Распределение локальной чувствительности по поверхности элементов постоянно.

Определены волновые свойства рассмотренного преобразователя, получено длинноволновое приближение, определяющее характер снижения его волновой чувствительности в зоне малых волновых чисел.

Для оценки эффективности подавления акустического шума использована скалярная волновая модель поля турбулентных давлений, базирующаяся на концепции [14]. В рамках представлений о диффузном характере акустической помехи установлен характер влияния четырех параметров (числа Маха M , относительного уровня акустической помехи K_a , геометрического фактора $\alpha = R_1/R_2$ и безразмерной частоты ρ_ω) на регистрируемые двухэлементным приемником уровни частотного спектра пристеночных турбулентных давлений.

Используемый подход позволяет оценивать оптимальные размеры рассмотренного двухэлементного преобразователя в зависимости от условий измерений и актуального частотного диапазона. В частности, в расчетах получено, что для значений $M = 0.1$ использование приемника с оптимальным отношением α , составляющим примерно $1 : 30$, способно обеспечить подавление акустического шума с относительным уровнем $K_a = 1$ в наиболее широком диапазоне безразмерных частот ρ_ω , лежащем в диапазоне $0.1 \dots 0.9$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-02-00181 А)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Willmarth W.W.* Wall pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Annual Review of Fluid Mech.* N.-Y. 1975. V. 7. P. 13–38.
2. *Eckelmann H.* A review of knowledge on pressure fluctuations / Near-wall Turbulence. Proc. 1988 Zoran Zaric Memorial Conf. Kline S., Afgan N.H. (Eds). N.Y., Hemisphere, 1990. P. 328–347.
3. *Bull M.K.* Wall-pressure fluctuation beneath turbulent boundary layers: some reflections of forty years of research // *J. Sound Vib.* 1996. V. 190(3). P. 299–315.
4. *Blake W.K.* Mechanics of flow-induced sound and vibration. V. I, II. New York: Academic Press, 1986.
5. *Смоляков А.В.* Шум турбулентных потоков. СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005. 312 с.
6. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пристеночные пульсации давления. М.: Научный мир, 2007. 223 с.
7. *Fahy F., Walker J.* Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration. London: Spon. 2004. 656 p.
8. *Баженова Л.А.* Источники шума аэродинамического происхождения в воздуходушных машинах // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 3. С. 369–378.
9. *Arguillat B., Ricot D., Bailly C., Robert G.* Measured wavenumber: Frequency spectrum associated with acoustic and aerodynamic wall pressure fluctuations // *J. Acoustic. Soc. Am.* 2010. V. 128. № 4. P. 1647–1655.
10. *Бычков О.П., Фараносов Г.А.* Анализ взаимной связи модовой структуры пульсаций ближнего поля струи и шума взаимодействия струи и крыла // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 1. С. 34–45.
11. *Кудашев Е.Б.* Подавление акустических шумов, действующих в экспериментальной установке при измерении пристеночных пульсаций давления // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 5. С. 644–649.
12. *Кудашев Е.Б., Веребевский И.Д.* Измерение турбулентных пульсаций давления на фоне акустических помех // *Исследования в области гидродинамических измерений. Труды метрологических институтов СССР.* 1975. Вып. 157(217). С. 107–111. М.: Изд. Стандартов, 1975.
13. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Активная компенсация акустических и температурных шумов при измерении турбулентных давлений // *Изв. ВУЗов. Энергетика.* № 8. С. 77–83.
14. *Corcos G.M.* On the resolution of pressure in turbulence // *J. Acoust. Soc. Am.* 1963. V. 35. P. 192–199.
15. *Ефимцов Б.М.* Характеристики поля пристеночных турбулентных пульсаций давления при больших числах Рейнольдса // *Акуст. журн.* 1982. Т. 28. № 4. С. 491–497.
16. *Смоляков А.В., Ткаченко В.М.* Модели поля псевдозвуковых турбулентных пристеночных давлений и опытные данные // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 6. С. 1199–1207.
17. *Leclerq D.J.J., Bohineust X.* Investigation and modelling of the wall pressure field beneath a turbulent boundary layer at low and medium frequencies // *J. Sound Vib.* 2002. V. 257. P. 477–501.
18. *Van Blitterswyk J., Rocha J.* An experimental study of the wall-pressure fluctuations beneath low Reynolds number turbulent boundary layers // *J. Acoustic. Soc. Am.* 2017. V. 141. № 2. P. 1257–1268.
19. *Голубев А.Ю., Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пульсации давления в акустике и аэродинамике. М.: Физматлит, 2019. 424 с.