

3. Пат. 155117 РФ. Устройство для измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов / К. Ю. Сахаров, В. А. Туркин, О. В. Михеев, А. В. Сухов // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 26.

4. Кузнецов М. П., Мафусаилов А. А., Животовский Н. К., Зайцев Е. Ю., Сунгуров Д. С. Сглаживающие алгоритмы прогнозирования // Машинное обучение и анализ данных. 2011. Т. 1. № 1. С. 104—112.

5. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978.

6. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.

7. Novotny M., Slepicka D. Uncertainty Analysis of the Phase and RMS Value by Non-Coherent Sampling in the Frequency Domain // Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2005. Ottawa, Canada. V. 3. P. 2114—2117.

8. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

Дата принятия: 01.04.2016.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.39

Волновая фильтрация пульсаций давления с помощью мелкоячеистых сеток

А. Ю. ГОЛУБЕВ

Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, Жуковский, Россия, e-mail: alexeygolubev@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований параметров элемента волнового фильтра, конструктивная реализация которого основана на расположении приёмника пульсаций давления в полости под мелкоячеистой сеткой. Приведены оптимальные размеры элемента, позволяющие реализовать максимальное усреднение малых длин волн. Предложен способ определения эффективности рассматриваемого фильтра.

Ключевые слова: мелкоячеистая сетка, пульсации давления, частотно-волновой спектр, коротковолновые компоненты.

The results of experimental studies are presented of testing the antenna element determining the long-wavelength components of wall pressure fluctuations, the design implementation of which is based on the receiver's location in a cavity under the fine mesh grid. The optimal size of the element is defined, at which the maximum averaging of short wavelengths is realized. A method for determining of its effectiveness is suggested.

Key words: fine mesh grid, pressure fluctuations, wave-frequency spectrum, short-wave components.

Колебания упругой конструкции под воздействием набегающего потока определяются структурой полей аэродинамических пульсаций давления турбулентного пограничного слоя. Случайный характер полей приводит к необходимости применения вероятностного подхода для их представления. В частотной области пульсации давления описывают спектральной плотностью $\Phi(\mathbf{x}, \omega)$, взаимной спектральной плотностью сигналов $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega)$, задаваемых радиусами-векторами $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$ на обтекаемой поверхности, а также нормированным спектром пространственных корреляций:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) &= \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) / [\Phi(\mathbf{x}, \omega) \Phi(\mathbf{x}', \omega)]^{1/2} = \\ &= |\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega)| e^{i \arg \varphi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ω — циклическая частота.

С точки зрения цифрового анализа данных функция (1) соответствует нормированному взаимному спектру. Модуль функции определяет степень организованности пульсаций давления на обтекаемой поверхности, а аргумент — конвективные свойства.

При решении задач колебаний и акустического излучения упругих конструкций под действием аэродинамических

пульсаций давления, а также при расчёте акустического излучения во внешнее пространство требуется ещё одна характеристика — частотно-волновой спектр. Этот спектр для инвариантного в пространстве поля пристенных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в ортогональной системе координат на обтекаемой поверхности описывают выражением

$$\Phi(\mathbf{k}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\boldsymbol{\xi}, \omega) e^{-i\mathbf{k}\boldsymbol{\xi}} d\boldsymbol{\xi}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{x}' - \mathbf{x} = (\xi_1, \xi_2)$ — радиус-вектор разнесения приёмников; $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$ — волновой вектор.

Волновым числом называют величину, обратно пропорциональную длине волны $k = 2\pi/\lambda$. Область малых волновых чисел соответствует длинноволновым компонентам и, напротив, область больших волновых чисел — коротковолновым. Волновой вектор непосредственно связан с волновым пакетом, распространяющимся в направлении, определяемом этим вектором. Как правило, для вектора $\mathbf{k}_1$ выбирают

направление, параллельное направлению потока, а для вектора $\mathbf{k}_2$ — ортогональное потоку в плоскости, параллельной плоской границе обтекаемой поверхности.

Условно волновой спектр аэродинамических пристенных пульсаций давления (на фиксированной частоте) может быть разделён на несколько областей (рис. 1). Основная часть энергии сосредоточена в конвективной области, центр которой локализован в окрестности волнового числа $k_1 = \omega/v_k$, где v_k — конвективная скорость потока (средняя скорость распространения возмущений в потоке на частоте ω). В области волновых чисел, ограниченных окружностью $|\mathbf{k}| \leq k_0$ ($k_0 = \omega/c$ — акустическое волновое число; c — скорость звука), расположена акустическая область. Здесь сосредоточен шум, индуцируемый потоком. Между конвективной и акустической областями находится субконвективная область. Для прогноза нагрузок на поверхности необходимо знать интенсивность во всем частотно-волновом спектре. Это связано с тем, что чувствительность упругой конструкции в различных областях частотно-волнового спектра существенно различается [1].

Особенности формы и расположения конвективного пика непосредственно связаны с комплексной функцией φ (см. (1)). По аргументу функции (1), который представляет фазовый сдвиг между сигналами в различных точках пространства, можно найти конвективную скорость $v_k = \omega \xi_1 / \arg \varphi$. Зная скорость v_k , можно установить положение конвективного пика волнового числа. Затухание модуля нормированного взаимного спектра по пространству определяет добротность конвективного пика (аналогично декременту затухания и добротности резонансного пика в механических системах).

Непосредственное определение интенсивности частотно-волнового спектра по всему волновому пространству является трудной экспериментальной задачей. Основной проблемой является то, что интенсивность пульсаций давления вдали от конвективного пика (в акустической и субконвективной областях) существенно меньше, чем в окрестности $k_1 = \omega/v_k$. Выполнение пространственного преобразования Фурье по выражению (2) приводит к значительным погрешностям в длинноволновой области, что связано со слабым пространственным разрешением. Возникает необходимость разработки дополнительных измерительных методик и инструментов, направленных на снижение интенсивности конвективного пика, т. е. выполняющих аналоговую волновую фильтрацию.

В настоящее время наибольшее применение нашли способы волновой фильтрации с помощью резонансно колеблющихся элементов [2, 3]. Использование этих способов существенно ограничено, с одной стороны, трудностями методического и конструктивного характера, а с другой — крайне малым объемом получаемой измерительной информации.

Волновую фильтрацию можно выполнять также с помощью отдельных приёмников или антенны приёмников (с последующим суммированием фазированных сигналов или с противоположным подключением по фазе отдельных приёмников), позволяющих выделять энергию, сконцентрированную в области малых волновых чисел. На рис. 2 представлены волновые характеристики (доля энергии $\bar{E}$ пульсаций давления, регистрируемой источником) приёмника диаметром 20 мм и антенны, состоящей из точечных приёмников,

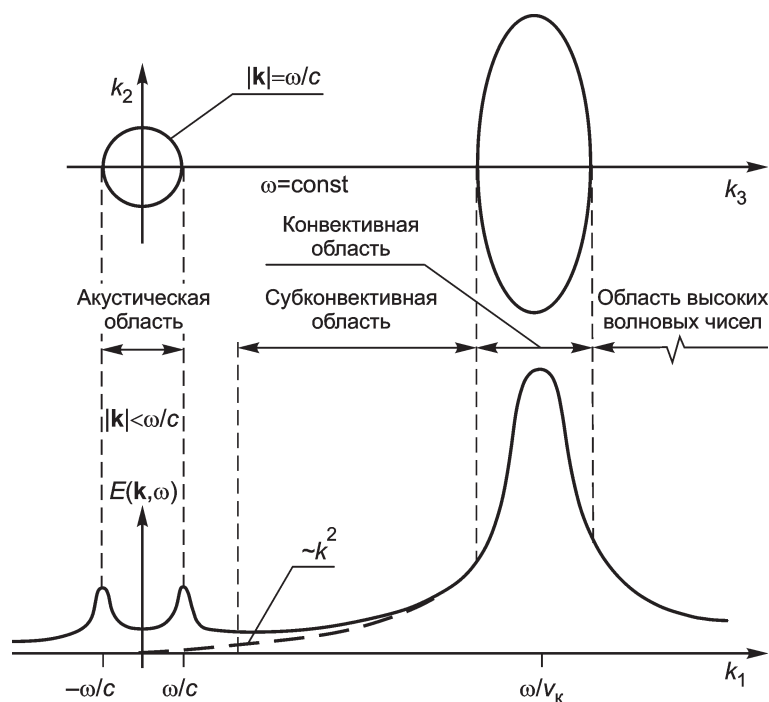


Рис. 1. Волновой спектр пульсаций давления

расположенных с шагом 20 мм. Хотя установка отдельных приёмников большого размера является вполне осуществимой, этот способ волновой фильтрации применяется только в качестве дополнительного инструмента, что связано с малой крутизной его волновой характеристики. В этом случае регистрируемый сигнал представляет совокупность энергий, сосредоточенной в области малых волновых чисел и уменьшенной (вследствие волновой фильтрации) энергии, связанной с конвективным пиком.

Несмотря на кажущуюся простоту данного способа измерений, его практическое приложение в существенной степени ограничено, прежде всего, необходимостью перенастройки линейки приёмников при проведении измерений по всему частотному диапазону. Это связано со смещением провала в волновой характеристике при изменении частоты.

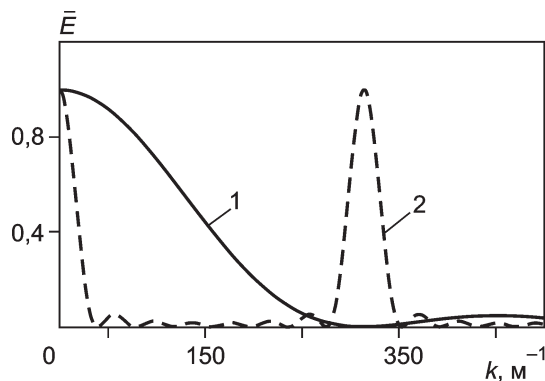


Рис. 2. Волновые характеристики отдельного приёмника диаметром 20 мм (1) и антенны, состоящей из точечных приёмников, расположенных с шагом 20 мм (2)

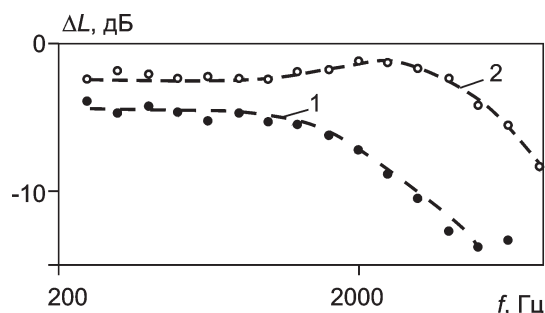


Рис. 3. Разность спектральных уровней пульсаций давления, регистрируемых приёмником 8514-10, расположенным на обтекаемой поверхности в полостях диаметрами 18; 4,5 мм, соответственно (1), (2)

Другое ограничение — шаг приёмников должен быть больше их размера, что в ряде случаев может существенно снижать эффективность волновой фильтрации. Дополнительной измерительной трудностью является точность установки отдельных приёмников антенны, так как отклонение их позиции от положения на одном уровне с поверхностью на 20 мкм и более в поле аэродинамических пульсаций давления приводит к существенным искажениям регистрируемых сигналов.

Перспективным представляется расположение антенны приёмников под мелкоячеистой сеткой. Это, с одной стороны, позволяет увеличить волновую избирательность, которая уже будет связана не с физическими размерами приёмников, а с сеткой над ними (эффективным размером приёмника), с другой — установить приёмники на расстоянии, меньшем их эффективного размера. Немаловажными факторами являются существенное снижение требований к их установке и расширенные возможности перенастройки антенны под мелкоячеистой сеткой.

Такой способ установки отдельного приёмника применительно к задаче выделения акустического сигнала описан, в частности, в [4]. Результаты измерений, представленные ниже, показывают, что подобную конструкцию можно использовать только для выделения акустического сигнала достаточно большой интенсивности. В [4] также не сказано о выделении акустического сигнала, а упоминается только о существенном увеличении отношения акустического сигнала к аэродинамическому из-за снижения интенсивности последнего.

В настоящей работе рассмотрены особенности установки приёмника под мелкоячеистой сеткой применительно к задаче его дальнейшего использования в качестве элемента антенны, выполняющей волновую фильтрацию.

Методика измерений. Лабораторные экспериментальные исследования были выполнены на аэроакустической установке П-1, рабочая часть которой имеет прямоугольное сечение 21,4×221,0 мм. Поток в рабочей части установки реализуется системой двух нагнетателей (высоконапорных радиальных вентиляторов); максимальная скорость потока составляет 68 м/с. При проектировании установки был выполнен ряд мероприятий, направленных на снижение её шумности и турбулентности. В частности, входное устройство установки размещено в камере (форкамере) объёмом около 3,4 м³, внутренняя поверхность которой облицована звукопоглощающим материалом. Перед этой камерой установлена дополнительная система резонансных глушителей. Во

входном профилированном коллекторе осуществляется плавный переход от кругового поперечного сечения к прямоугольному при отношении площадей сечений порядка 12. Степень турбулентности в рабочей части установки менее 1 %. На стенке рабочей части формируется поле пульсаций давления невозмущённого турбулентного пограничного слоя на частотах более 100 Гц, что позволяет испытывать конструкции приёмников пульсаций давления.

В экспериментах сигналы от приёмников пульсаций давления поступали на плату аналого-цифрового преобразователя типа 4452 (National Instruments). Скорость оцифровки сигналов составляла 60000 значений в секунду. Приёмник пульсаций давления располагался на дне полости, закрытой со стороны потока мелкоячеистой сеткой. Использовались приёмники пульсаций давления двух типов: 8514-10 «Эндево» (диаметр приёмника 1,7 мм) и 4136 «В&К Брюль и Кьер» (микрофон 1/4 дюйма). Мелкоячеистая сетка толщиной 0,15 мм имела регулярную систему отверстий диаметром 0,25 мм и шагом 0,75 мм по всей площади и была установлена на одном уровне со стенкой канала. Кроме того, применялся второй вариант сетки, представляющей плетёную равномерную структуру из тонких металлических нитей, расположенных под углом 90°. Измерения проводили в диапазонах диаметров $D = 4,5...70$ мм и глубин $h = 0,5...1,5$ мм полости. В этих интервалах частота резонатора Гельмгольца, определённая по диаметру отверстия и примыкающему объёму воздуха под этим отверстием, составляла 30 кГц и более, т. е. находилась за пределами звукового диапазона частот.

Результаты экспериментальных исследований. На рис. 3 показан эффект снижения регистрируемых спектральных уровней ΔL пульсаций давления при расположении приёмника под мелкоячеистой сеткой различных диаметров ($D = 4,5; 18$ мм) по сравнению с приёмником, установленным на одном уровне с обтекаемой поверхностью. Аналогичное сопоставление экспериментальных данных получено для приёмника 4136. Для каждого приёмника характерные размеры полости, при которых наиболее ярко выражены эффекты ослабления спектральных уровней пульсаций давления системой «сетка-полость», в разных частотных полосах несколько различаются. В частности, для приёмника 8514-10 максимальный эффект ослабления (5 дБ в области средних и 13 дБ в области высоких частот) наблюдается при $D = 18$ мм, при дальнейшем увеличении диаметра полости регистрируемые спектральные уровни изменяются незначительно. При подаче на громкоговоритель, устанавливаемый в рабочей части аэроакустической установки (при отсутствии потока), белого шума практически во всем охваченном диапазоне частот ослабление зарегистрированных спектральных уровней приёмником под сеткой не превышает 1,5 дБ.

С увеличением глубины полости (в исследуемом диапазоне $h = 0,5...1,5$ мм) также наблюдается постепенное ослабление регистрируемых спектральных уровней вследствие осреднения коротковолновых компонентов. В наибольшей степени этот эффект проявляется в диапазоне $h \leq 1$ мм, дальнейшее увеличение глубины полости приводит к постепенному снижению эффективности волновой фильтрации. Предложенный второй вариант сетки также оказался менее приспособленным для решения рассматриваемой задачи.

Таким образом, при использовании сетки и полости над приёмником увеличивается эффективный размер воспринимающей поверхности, что приводит к осреднению коротковолновых составляющих и снижению регистрируемых спектральных уровней во всем диапазоне частот. Это свидетельствует о возможности применения данной конструкции в качестве элемента волнового фильтра. Существуют оптимальные размеры полости, при которых наблюдается наибольшее снижение спектральных уровней. Дальнейшее увеличение размеров полости неэффективно, что связано с затуханием пульсаций давления при увеличении расстояния между приёмником и отверстиями сетки.

Для оценки влияния волновой фильтрации на взаимные спектры пульсаций давления были проведены измерения с помощью пары приёмников 8514-10, установленных на фиксированном расстоянии 3 мм друг от друга, поочередно в продольном и ортогональном относительно потока направлениях на обтекаемой поверхности и под сеткой с полостью глубиной 1,5 мм и диаметром 18 мм при скорости набегающего потока 68 м/с. Расположение двух приёмников в полости под сеткой приводит к тому, что модуль продольного нормированного взаимного спектра существенно увеличивается в достаточно протяжённой области низких и средних частот (по сравнению с их расположением на обтекаемой поверхности), в поперечном направлении степень взаимосвязи возрастает ещё больше — примерно в два раза по всему частотному диапазону. Данный эффект непосредственно связан с усреднением коротковолновых составляющих.

Процесс волновой фильтрации характеризуется частотной зависимостью фазового сдвига между сигналами приёмников, установленных на обтекаемой поверхности и под мелкоячеистой сеткой (рис. 4). В области низких и средних частот использование сетки не приводит к существенному изменению фазового сдвига. Это свидетельствует о том, что в этой области частот центр тяжести частотно-волнового спектра расположен под конвективным пиком и практически не смещается. Дальнейшее увеличение частоты приводит к постепенному уменьшению фазового сдвига, обусловленному смещением центра тяжести частотно-волнового спектра в область малых волновых чисел, что непосредственно связано с постепенным снижением доли энергии в окрестности конвективного пика из-за волновой фильтрации. В области высоких частот фазовый сдвиг становится малым, что свидетельствует о вырождении конвективного пика и равномерном распределении интенсивности волнового спектра по оси k_1 (см. рис. 1).

Таким образом, в исследуемом диапазоне размеров полости и скоростей потока (соответствующем верхней границе диапазона чисел Маха аналогичной конструкции приёмника фирмы G.R.A.S.) не обнаруживается акустический сигнал в большей части частотного диапазона (судя по фазовому сдвигу, имеет место конвективное поле пульсаций давления). Это связано, прежде всего, с малошумностью аэроакустической установки. Тем не менее, если звуковое давление будет выше, чем регистрируемые под сеткой аэродинамические пульсации давления, то звуковые колебания могут

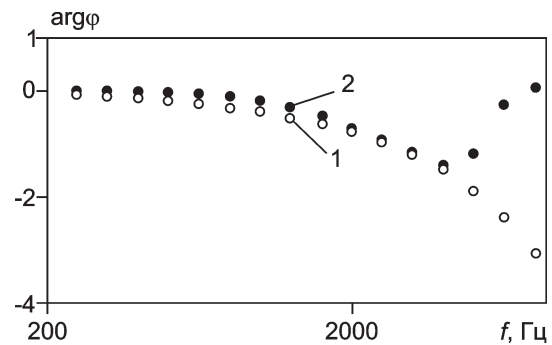


Рис. 4. Частотная зависимость фазового сдвига для пары приёмников, расположенных на обтекаемой поверхности (1) и под мелкоячеистой сеткой (2)

быть выделены (особенно это касается узкополосных спектральных составляющих).

Закключение. Выполнены экспериментальные исследования по выбору параметров элемента антенны волнового фильтра, основанному на расположении приёмников пульсаций давления под мелкоячеистой сеткой. Показано, что применение сетки, не приводящее к заметным искажениям акустических сигналов, сопровождается существенным снижением регистрируемых уровней аэродинамических пульсаций давления вследствие усреднения коротковолновых составляющих. Это свидетельствует о возможности использования данной конструкции в качестве элемента волнового фильтра (элемента антенны приёмников, расположенных под сеткой) для фильтрации длинноволновых составляющих частотно-волнового спектра. Определены оптимальные размеры полости под мелкоячеистой сеткой, при которых наблюдается максимальное снижение пульсаций давления. Также показано, что в полости под сеткой наблюдается конвективное поле пульсаций давления в большей части частотного диапазона.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (грант № 14.Z50.31.0032).

Л и т е р а т у р а

1. Смольяков А. В., Ткаченко В. М. Измерение турбулентных пульсаций. Л.: Энергия, 1980.
2. Котов А. Н. Волновые мембранные фильтры для оценки волновых спектров пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в субконвективной области // Акустический журнал. 2012. Т. 58. N. 6. С. 770—775.
3. Голубев А. Ю. Экспериментальная оценка волновых спектров пристенных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в субконвективной области // Акустический журнал. 2012. Т. 58. N 4. С. 1—9.
4. G.R.A.S. Turbulence Screen Microphones [Официальный сайт] <http://www.gras.dk/products/special-microphone/turbulence-screen-microphones.html> (дата обращения: 18.03.2016).

Дата принятия: 18.05.2016.