

УДК 532.526.4

ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБТЕКАЕМЫХ ВЫСТУПАЮЩИХ ТЕЛ

© 2020 г. А. Ю. Голубев^{а,*}, Г. А. Потокин^{а,**}

^а Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, Москва, Россия

*E-mail: alexeygolubev@yandex.ru

**E-mail: gpotokin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

Проведены экспериментальные исследования полей пристенных турбулентных пульсаций давления на поверхности трехмерных обтекаемых выступающих тел. Демонстрируется существенная неоднородность и трехмерность поля в измерительном пространстве. Представлена зависимость основных характеристик пульсаций давления от геометрических параметров, демонстрируется влияние толщины пограничного слоя.

Ключевые слова: полусфера, выступающее тело, пульсации давления, спектральная плотность, нормированный взаимный спектр

DOI: 10.31857/S0568528120010065

Особенности конструктивного исполнения летательных аппаратов приводят к тому, что помимо однородного поля пульсаций давления невозмущенного безградиентного пограничного слоя, на обтекаемой поверхности формируются дополнительные возмущения, основные характеристики которых изменяются по пространству (неоднородные поля). Характерными примерами таких полей на обтекаемой поверхности современного скоростного пассажирского самолета являются пристенные пульсации давления в окрестности мелкомасштабных геометрических неоднородностей, например, при обтекании прямых и обратных уступов [1, 2].

Другим примером геометрических неоднородностей на обтекаемой поверхности летательного аппарата являются трехмерные выступающие тела, примером которых являются защитные обтекатели над располагающимся под ними оборудованием. Ограничение уровней акустических нагрузок на оборудование приводит к необходимости определения пространственно-временной структуры полей пульсаций давления на поверхности этих обтекателей, что невозможно без проведения экспериментальных и расчетных исследований.

Обтекание выступающих тел является малоизученной областью, что связано прежде всего со сложностью описания трехмерных пограничных слоев. В качестве примера можно привести работу [3], в которой рассматривается процесс формирования организованных крупномасштабных структур в виде шпилькообразных вихрей, возникающих при срыве потока с верхней поверхности полусферы, и работу [4], в которой рассматривается моделирование шероховатости поверхности с помощью полусфер и полукубов. Расчетным путем были получены картины распределения основных аэродинамических характеристик — мгновенных скоростей и статического давления на поверхности таких элементов и оценена интенсивность акустического излучения во внешнее пространство.

Малая изученность данной проблемы делает актуальным проведение дополнительных исследований. Представленная работа посвящена определению пространственно-временной структуры и особенностям проведения параметрического анализа поля пульсаций давления на поверхности выступающих обтекаемых тел.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИСТЕННЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Мгновенные значения давления $P(x, t)$ на стенке изменяются случайным образом как в пространстве (от одной точки наблюдения к другой), так и во времени (от одного момента к друго-

му), т.е. поле давления в этом случае течения следует трактовать как случайное по пространству ($\mathbf{x}$) и времени (t). Мгновенное значение давления $P(\mathbf{x}, t)$ можно представить в виде

$$P(\mathbf{x}, t) = P(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}, t)$$

Математическое ожидание $\langle P(\mathbf{x}, t) \rangle$ по существу определяет пространственное распределение статического давления $P(\mathbf{x})$, а центрированная функция $p(\mathbf{x}, t)$ описывает случайное по пространству и времени поле пульсаций давления. Угловые скобки означают осреднение по ансамблю реализаций процесса.

На уровне двухточечных моментов второго порядка поле $p(\mathbf{x}, t)$ описывается пространственно-временной корреляционной функцией

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t, t') = \langle p^*(\mathbf{x}, t) p(\mathbf{x}', t') \rangle$$

где $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$ — векторы, координирующие положение двух точек наблюдения в пространстве, а t и t' — два разных момента времени, $\tau = t' - t$. Звездочка, как это принято, означает комплексно сопряженную величину.

Также поле пристенных пульсаций давления можно описывать с помощью спектра пространственных корреляций $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega)$, связанного с функцией $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \tau)$ соотношением:

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

При $\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}$ он вырождается в вещественную четную функцию частоты $\Phi(\mathbf{x}, \omega)$ (которую обычно называют спектральной плотностью).

Степень пространственной связи спектральных составляющих поля пульсаций давления описывается нормированным спектром пространственных корреляций

$$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) = \frac{\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega)}{[\Phi(\mathbf{x}, \omega) \Phi(\mathbf{x}', \omega)]^{1/2}}$$

который называют взаимным спектром. В общем случае он также имеет вещественную (Re), мнимую (Im) части, его можно также представить в экспоненциальном виде

$$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) = |\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega)| e^{i \arg \varphi}$$

Для неоднородных полей может наблюдаться существенное изменение основных характеристик пульсаций давления — спектральной плотности, степени взаимосвязи и конвективных свойств по измерительному пространству, в связи с чем для их описания в первом приближении используют понятия локального масштаба корреляции и локальной фазовой скорости.

При рассмотрении данной задачи необходимо выбрать определяющие параметры подобия, в качестве которых используются величины, предложенные при обтекании уступов [1] — высота препятствия h и скорость потока U . Обычно рассматривается функциональная зависимость основных характеристик пульсаций давления, например, безразмерной спектральной плотности $\Phi(\omega)U/q^2h$ от числа Струхала $Sh = \omega h/U$. В данном соотношении $\Phi(\omega)$ — спектральная плотность пульсаций давления, q — скоростной напор. Остальные величины, от которых могут зависеть характеристики полей пульсаций давления — число Рейнольдса Re , число Маха $M = U/c$, безразмерная высота конфигурации h/δ , координаты точки наблюдения x_i/h являются параметрами при рассмотрении данной задачи.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения проводились на аэроакустической установке П-2 НИМК ЦАГИ. Рабочая часть аэроакустической установки П-2 представляет собой канал прямоугольного сечения 500×160 мм длиной 6 м. Перед ее рабочей частью располагается конфузор с односторонним поджатием ~ 9.5 . Для снижения степени турбулентности в рабочей части этой аэроакустической установки на входе в конфузор располагается мелкая ячейчатая сетка. За рабочей частью трубы размещается безотрывной диффузор длиной 3 м, на выходе которого расположен глушитель с эффективным диа-

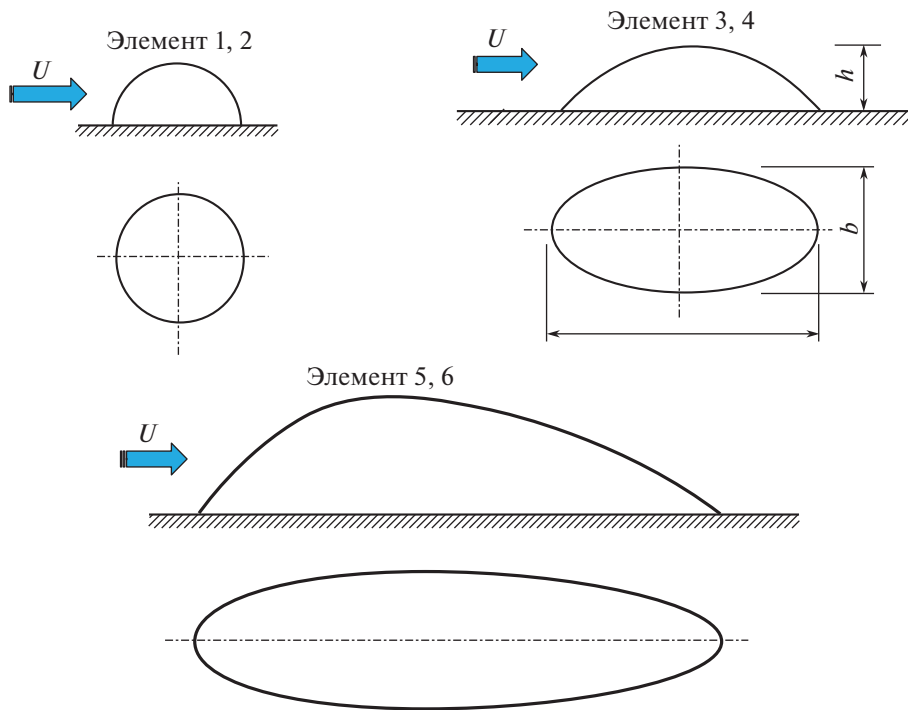


Рис. 1. Схемы выступающих элементов.

метром 450 мм, заканчивающийся заглушенной камерой объемом 2 м^3 . Эта камера связана с помощью трубопровода $600 \times 400 \text{ мм}$ с системой нагнетателей, размещаемых за капитальной кирпичной стеной. Система нагнетателей представляет собой 4 параллельно соединенных вентилятора, которые могут включаться как одновременно, так и поочередно. Максимальная скорость потока, реализуемая в рабочей части установки П-2, составляет 68.5 м/с .

Практически по всей длине рабочей части аэроакустической установки П-2 профили скорости являются подобными и близкими к профилю скорости турбулентного пограничного слоя. Максимальная толщина пограничного слоя, реализуемая в аэроакустической установке П-2, составляет 70 мм . Результаты методических измерений пристенных пульсаций давления и пульсаций скорости в ядре сечения при различных положениях измерительной зоны аэроакустической установки П-2 свидетельствуют о малых турбулентности и шумности этой установки.

Экспериментальные исследования были выполнены с помощью приемников пульсаций давления Кюлайт XCS-062-5A диаметром 1.63 мм . В качестве регистрирующей системы использовалась плата АЦП фирмы National Instruments типа 4472 с 8 каналами регистрации. Оцифровка сигналов осуществлялась с частотой $30\,000$ значений/сек. Спектральный и корреляционный анализ проводился с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Измерения проводились для различных выступающих тел, эскизы которых представлены на рис. 1. Можно видеть, что тела 1-2 представляют из себя полусферические выступающие тела; тела 3, 4 также являются типовыми конфигурациями; тела 5, 6 являются эскизами выступающих тел, отличающимися от типовых. Ниже представлена табл. 1, в которой указаны размеры тел.

Будем обозначать высоту выступающего элемента через h , длину l , ширину b . Очевидно, что для полусферы, располагающейся на обтекаемой поверхности $h = l/2 = b/2$. Можно видеть, что выступающие тела 1 и 2 отличаются друг от друга в 2 раза по всем размерам, т.е. элемент 2 в 2 раза больше элемента 1. Выступающее тело 6 в 2 раза больше элемента 5. Сравнение результатов измерений с этими выступающими телами позволяет в некоторой степени оценить влияние безразмерной высоты конфигурации.

Таблица 1

Элемент	l , мм	b , мм	h , мм
1	30	30	15
2	60	60	30
3	60	30	15
4	120	30	15
5	60	15	15
6	120	30	30

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Картина обтекания выступающих тел во многом сходна с обтеканием уступов (рис. 2). Перед прямым уступом наблюдается отрыв потока, сопровождающийся формированием зоны рециркуляции, характеризующейся наличием возвратного течения. В верхней зоне над зоной рециркуляции наблюдается присоединение оторвавшегося потока. Далее за кромкой вновь происходит отрыв потока с формированием зоны рециркуляции, но существенно меньшего размера, чем перед прямым уступом. После зоны рециркуляции наблюдается присоединение оторвавшегося потока. Задняя кромка выступа является фиксированной точкой отрыва, что сопровождается формированием еще одной рециркуляционной зоны, конец которой связан с присоединением оторвавшегося с выступа потока. Таким образом, обтекание выступа в двумерной постановке представляет собой последовательность рециркуляционных зон и зон присоединения.

Картина обтекания потоком полусферы, расположенной на обтекаемой поверхности, также представлена в работе [4]. Перед полусферой так же, как и перед выступом формируется зона рециркуляции, для которой характерно наличие возвратного течения. Передвижение по поверхности полусферы сопровождается постепенным присоединением оторвавшегося потока. За точкой наибольшего подъема наблюдается отрыв, характеризующийся повышенным вихреобразованием и формированием крупномасштабных структур, распространяющихся вниз по потоку. Это явление наблюдается по всей задней поверхности полусферы, но по мере приближения точки наблюдения к обтекаемой поверхности наблюдается некоторое ослабление вихреобразования ввиду взаимодействия потока с трехмерным пограничным слоем.

Поле пульсаций давления, формирующееся на поверхности полусферы, в значительной степени является отражением аэродинамических процессов. Иллюстрация трансформации полей пульсаций давления в различных зонах полусферы представлена на рис. 3. Можно видеть, что в передней части полусферы (зона 1) наблюдается низкочастотный состав пульсаций давления, что свидетельствует о наличии в этой области зоны рециркуляции. Перемещение по поверхности полусферы сопровождается некоторым снижением спектральных уровней в области низких частот, что обусловлено снижением интенсивности рециркуляционной зоны. Дальнейшее перемещение точки наблюдения за точку наивысшего подъема (вершину) полусферы сопровождается резким увеличением спектральных уровней по всему частотному диапазону, обусловленному отрывом потока и повышенным вихреобразованием и появлением крупномасштабных структур (зона 3). Эта зона имеет резко выраженный неоднородный характер по пространству как в продольном (относительно потока) направлении, так при перемещении точки наблюдения по полусфере ортогонально направлению потока. Спектральные уровни в зоне отрыва потока и в задней частях полусферы примерно подобны, что свидетельствует об общности их физической природы. Как было отмечено выше, отрыв потока формируется на всей задней поверхности полусферы.

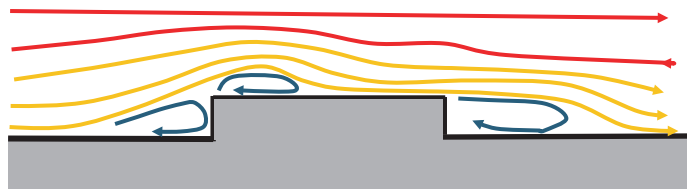


Рис. 2. Обтекание уступа.

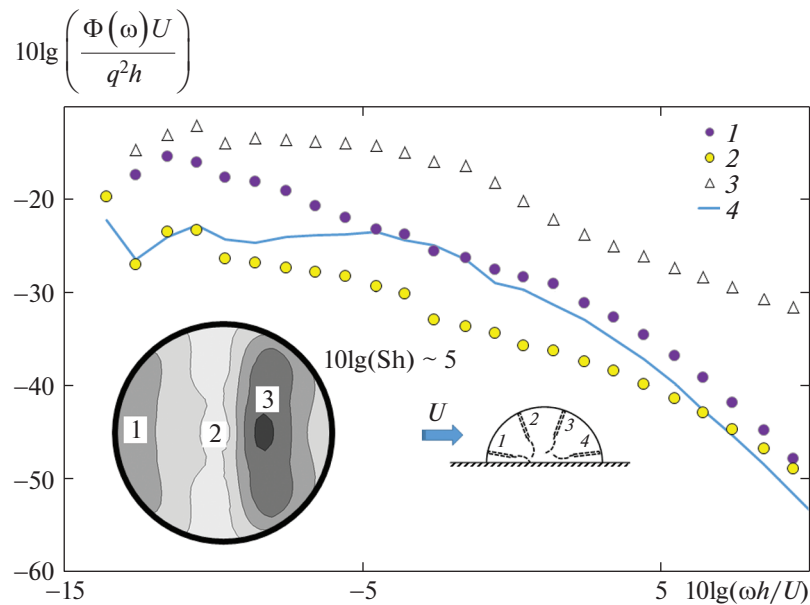


Рис. 3. Пульсации давления на поверхности полусферы ($U = 43$ м/с, $\delta = 37$ мм).

ры, но в нижней зоне наблюдается его затухание вследствие взаимодействия с трехмерным пограничным слоем, огибающим поверхность полусферы.

На рис. 3 также представлено сечение на фиксированном числе Струхала ($10\lg(Sh) = 5$) по всей поверхности полусферы. Данная зависимость получена в результате аппроксимации спектральных значений в различных измерительных точках на поверхности тела. Можно видеть, что зоны возмущений имеют близкий к двумерному характер за исключением зоны 3, в которой формируется выраженное трехмерное поле пульсаций давления. Именно в этой области и наблюдаются повышенные уровни пульсаций давления по сравнению с другими зонами. Однако наличие выраженной отрывной зоны на поверхности полусферы не является характерным для других исследуемых конфигураций, для которых явление отрыва не является выраженным и максимальные уровни пульсаций давления наблюдаются в передней зоне рециркуляции.

Изменение размера обтекаемого тела в поперечном относительно потока направлении неизбежно сопровождается некоторым изменением и формирующихся вихревых структур, которые становятся трехмерными. Рассмотрим это влияние для конфигураций, располагающихся ортогонально направлению набегающего потока. При этом высота конфигураций и их размер в направлении потока остаются неизменными. Можно видеть (рис. 4), что влияние трехмерного эффекта в целом достаточно незначительно. Данные представлены для измерительной точки наивысшего подъема. Совершенно другая ситуация наблюдается с ориентацией выступающих обтекаемых тел в направлении потока (рис. 5). Можно видеть, что наибольшие уровни регистрируются на поверхности элемента 1 (полусфера). Увеличение размера выступающего тела в направлении потока сопровождается существенным снижением спектральных уровней пульсаций давления.

Для моделирования полей пульсаций давления на поверхности выступающих тел необходимо прежде всего определиться с критериями подобия (параметры подобия были выбраны выше). Скорость потока не оказывает существенного влияния на безразмерную интенсивность пульсаций давления, что свидетельствует о слабом влиянии числа Рейнольдса и числа Маха в диапазоне параметров, используемых в эксперименте. Важным является определение безразмерной высоты конфигурации, так как неправильный выбор параметра может привести к значительным ошибкам при сравнении с результатами других экспериментов. Для этого необходимо оценить влияние возможных линейных параметров подобия — высоты конфигурации и толщины пограничного слоя.

На рис. 6 иллюстрируется влияние толщины пограничного слоя на примере выступающего тела 2 (большая полусфера) для двух измерительных точек, одна из которых расположена за точкой наивысшего подъема (в зоне отрыва потока), вторая в задней части полусферы. Измерения

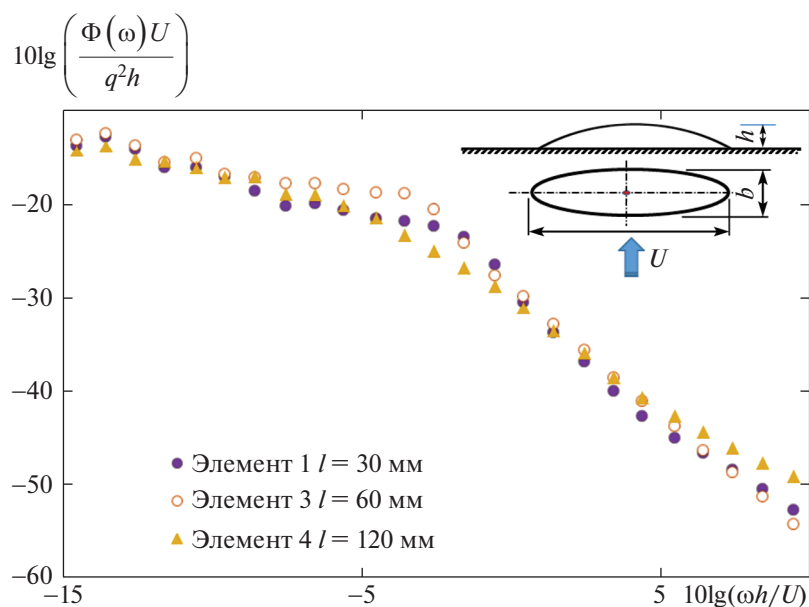


Рис. 4. Пульсации давления на поверхности выступающих тел при их поперечном расположении: $b = 30$ мм, $h = 15$ мм.

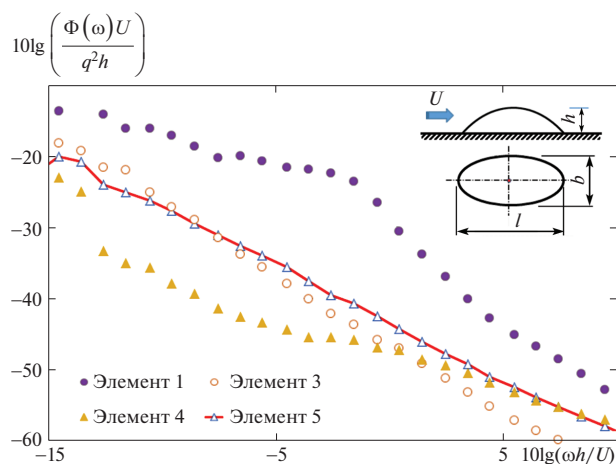


Рис. 5. Пульсации давления на поверхности выступающих тел при их продольном расположении ($h = 15$ мм).

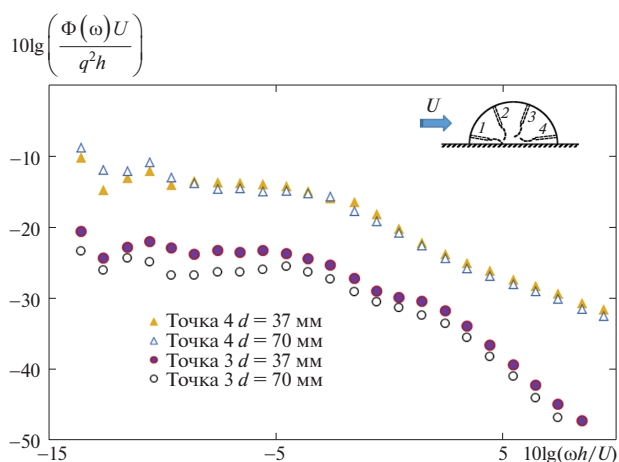


Рис. 6. Влияние толщины пограничного слоя на пульсации давления в различных зонах элемента 2.

проводились для двух толщин пограничного слоя 37 и 70 мм. Можно видеть, что в окрестности вершины полусферы влияние толщины пограничного слоя практически не наблюдается (так же, как и в передней части полусферы), в то время как в задней части полусферы при малых толщинах пограничного слоя наблюдаются большие спектральные уровни.

Данные результаты свидетельствуют о необходимости использования различных критериев подобия в отдельных зонах на поверхности выступающего элемента. В задней части выступающего тела можно использовать безразмерную высоту элемента по толщине пограничного слоя (h/δ). В этой зоне величина δ играет большую роль, что связано с взаимодействием трехмерного пограничного слоя, обтекающего конфигурацию с потоком, срывающихся с выступающего тела. Именно этот параметр, как правило, берется за основу при рассмотрении неоднородных полей пульсаций давления.

Однако в передней части выступающего тела влияние толщины пограничного слоя является небольшим. Действительно, между стенкой и оторвавшимся пограничным слоем располагается

зона рециркуляции с низкоскоростным течением, что приводит прежде всего к тому, что возрастает роль вязкого параметра, характерного для моделирования пульсаций давления турбулентного пограничного слоя при малых числах Рейнольдса [5]. Поэтому предпочтительно в этих областях использовать безразмерную высоту конфигурации в виде $\bar{h} = hc/\nu$, где c — скорость звука, ν — кинематическая вязкость.

Для корректного описания поля пульсаций давления необходимо также представление о степени организованности возмущений в потоке, которая определяется величиной модуля нормированного взаимного спектра и масштабами корреляции. Результаты исследований показывают, что в области малых чисел Струхала наблюдаются повышенные уровни как продольной, так и поперечной коррелированности (при расположении измерительных точек на вершине выступающего тела). Увеличение числа Струхала приводит к существенному снижению организованности поля пульсаций давления. Конвективные свойства поля в зоне наибольшего подъема характеризуются резко выраженными конвективными свойствами в продольном направлении (фазовая скорость примерно соответствует скорости набегающего потока), также наблюдается небольшой перенос возмущений в поперечном направлении.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-11-2018-234 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI 62718X0004).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований полей пульсаций давления, формирующихся на поверхности выступающих тел различной формы. Показано, что при обтекании сферических тел наибольшие спектральные уровни формируются в зоне отрыва пограничного слоя за точкой наибольшего подъема. При обтекании других выступающих тел наибольшие уровни формируются в передней зоне элементов. Показано относительно слабое влияние толщины пограничного слоя в передней и средней частях выступающего тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев А.Ю. Особенности полей пульсаций давления в окрестности конфигурации “прямой уступ-обратный уступ” // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 56–62.
2. Голубев А.Ю., Кузнецов С.В. Особенности полей пульсаций давления на поверхности выступов // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 6. С. 67–75.
3. Acarlar M.S., Smith C.R. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part 1. Hairpin vortices generated by a hemisphere protuberance // J. Fluid Mechanics. 1987. V. 175. P. 1–41.
4. Yang Q., Wang M. Computational study of boundary-layer noise to surface roughness // AIAA 2008-2905. 12 p.
5. Авиационная акустика. Ч. 2. Шум в салонах пассажирских самолетов / Под ред. А.Г. Мунина. М.: Машиностроение, 1986.