

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ВЫСТУПА НА ПРИСТЕНОЧНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ВБЛИЗИ ЕГО БОКОВОЙ КРОМКИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

© 2023 г. С. В. Кузнецов^а, *, А. Ю. Голубев^а

^аЦентральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

*e-mail: international44@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 11.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

Пристеночные пульсации давления в турбулентном течении являются источником шума и вибраций обтекаемых потоком упругих конструкций. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния высоты выступа на пространственно-временную структуру пристеночных пульсаций давления в окрестности его боковой кромки в турбулентном пограничном слое. Измерения проводились в дозвуковой малозумной аэродинамической трубе Московского комплекса ЦАГИ. Высота выступа варьировалась от 3% до 17% толщины набегающего пограничного слоя. Показано, что область наиболее интенсивных пульсаций давления локализована вблизи переднего бокового угла выступа. Установлено характерное число Струхала, определяющее спектры пульсаций давления за передней кромкой выступа. Показано существенное влияние высоты выступа на пространственно-временную структуру поля давления в окрестности боковой кромки. Полученные результаты свидетельствуют о наличии значительной корреляции с полем пульсаций давления набегающего турбулентного пограничного слоя в случае уступов малой высоты.

Ключевые слова: аэроакустические нагрузки, отрывное течение, турбулентный пограничный слой

DOI: 10.31857/S0320791922060089, **EDN:** SRKFJE

ВВЕДЕНИЕ

Пристеночные пульсации давления в турбулентных течениях являются одной из разновидностей аэроакустических нагрузок, воздействующих на поверхность летательного аппарата [1]. В отличие от акустических волн, обусловленных сжимаемостью среды и распространяющихся со скоростью звука, турбулентные пульсации давления связаны с вихревыми возмущениями жидкости или газа, т.е. имеют гидродинамическую природу. Скорость распространения турбулентных пульсаций одного порядка со скоростью среднего течения. По этой причине, их частотно-волновой состав существенно отличается от акустического поля [1–6]. Актуальные сведения об экспериментальных исследованиях турбулентных пристеночных пульсаций давления представлены, например, в работах [7–10].

Турбулентный пограничный слой на поверхности фюзеляжа пассажирского самолета является одним из основных источников шума в салоне [1, 6]. Это связано с тем, что воздействие пристеночных пульсаций давления на обтекаемую поверхность возбуждает колебания упругой кон-

струкции. В свою очередь, вибрации панелей обшивки приводят к излучению звука во внутреннее пространство фюзеляжа.

Выступающие элементы на поверхности самолета вызывают отрыв пограничного слоя [11]. Это сопровождается существенным увеличением интенсивности турбулентных пульсаций, изменением спектрального состава и пространственно-временной структуры пристеночных пульсаций давления. Это необходимо учитывать при решении задач авиационной акустики, усталостной прочности и аэроупругости.

К настоящему моменту накоплен немалый объем сведений о поле пристеночных пульсаций давления в окрестности прямых и обратных уступов [12–22], а также их комбинаций [23–26]. Однако, в литературе практически не освещен вопрос влияния конечности поперечного размера уступа, а также связанный вопрос изучения поля пристеночных пульсаций давления вблизи боковой кромки. Здесь можно выделить работы [16, 24]. Кроме того, стоит вопрос о влиянии взаимодействия набегающего пограничного слоя с отрывным течением в окрестности уступов и высту-

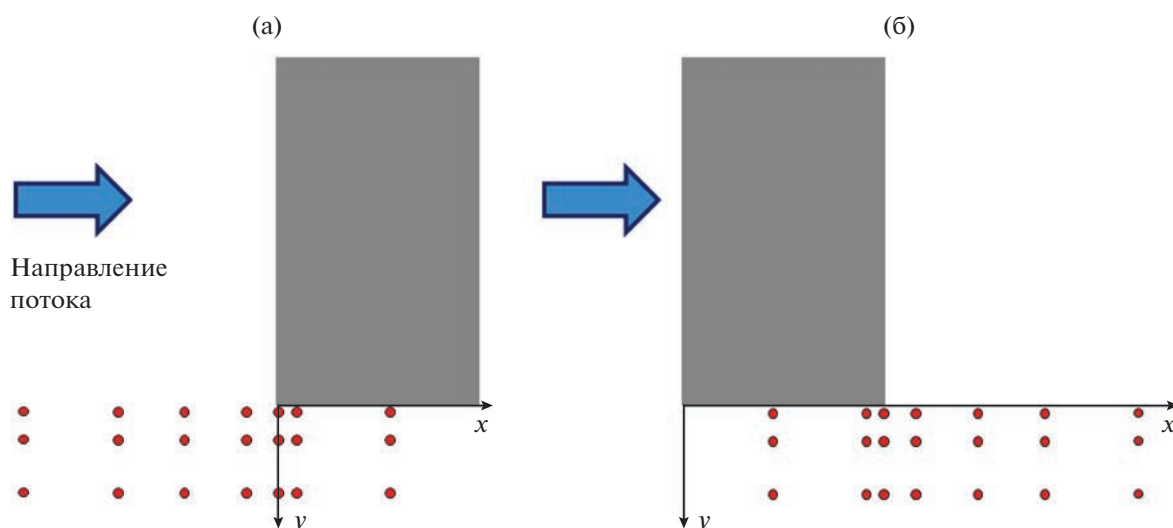


Рис. 1. Схема расстановки датчиков (а) — вблизи передней кромки, (б) — вблизи задней кромки выступа.

пов [27–29] на пространственно-временную структуру поля пульсаций давления.

Данная работа демонстрирует особенности полей пульсаций давления вблизи боковой кромки выступов различной высоты. Полученные сведения могут быть использованы при определении направлений для дальнейших исследований пристеночных пульсаций давления в отрывных турбулентных течениях, а также при разработке и уточнении моделей соответствующих аэроакустических воздействий для последующей оценки вибраций и акустического излучения тонкостенных конструкций фюзеляжа самолета.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились на аэроакустической установке П-2 Научно-исследовательского московского комплекса ЦАГИ. Установка представляет собой дозвуковую аэродинамическую трубу, в которой были предприняты меры по снижению шума в рабочей части. Рабочая часть трубы — это канал прямоугольного сечения 500×160 мм длиной 6 м. На входе в нее располагается конфузор с односторонним поджатием порядка 9.5. На входе в конфузор устанавливается мелкоячеистая сетка. За рабочей частью трубы размещается безотрывной диффузор длиной 3 м, за которым следует глушитель с эффективным диаметром 450 мм. Далее поток попадает в заглушенную камеру объемом 2 м^3 . Течение создается системой из 4 вентиляторов, размещенных за капитальной кирпичной стеной.

Эксперименты проводились при скорости в ядре набегающего потока $U = 41$ м/с. Толщина пограничного слоя δ составляла 60 мм, толщина вытеснения $\delta^* = 5.5$ мм, а толщина потери им-

пульса $\delta^{**} = 4.3$ мм. Число Рейнольдса по толщине пограничного слоя и скорости на его внешней границе составляло примерно 1.7×10^5 , а по толщине потери импульса и скорости на внешней границе — 1.2×10^4 . Размер исследуемых выступов составлял 38 мм в продольном (вдоль потока) направлении и 66 мм — в поперечном. Устанавливались выступы высотой $h = 2, 5$ и 10 мм. Таким образом, отношение высоты к толщине пограничного слоя равнялось 0.03, 0.08 и 0.17 соответственно.

Измерения осуществлялись линейкой из 7 датчиков пульсаций давления Endevco model 8514-10, ориентированной вдоль направления потока. Расстояния между соседними датчиками в линейке: 18, 12, 12, 6, 3 и 18 мм. Различные положения линейки датчиков (6 штук), а также система координат представлены на рис. 1. Ближайшее к выступу положение соответствует $y \approx 1$ мм от центра датчика. Сдвиг в поперечном направлении (вдоль оси y) осуществлялся пропорционально высоте выступа на $y/h = 1$ и $y/h = 3$.

Оцифровка производилась при помощи АЦП National Instruments PCI-4472 с частотой дискретизации 30 кГц. Перед оцифровкой сигнал обрезался аналоговым фильтром низких частот с частотой среза 12.5 кГц. Длительность реализации составляла 15 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Наличие выступа в турбулентном пограничном слое (ТПС) на гладкой плоской поверхности приводит к значительному увеличению интенсивности пристеночных пульсаций давления. На рис. 2 представлена разность среднеквадратичных уровней мощности пульсаций давления в из-

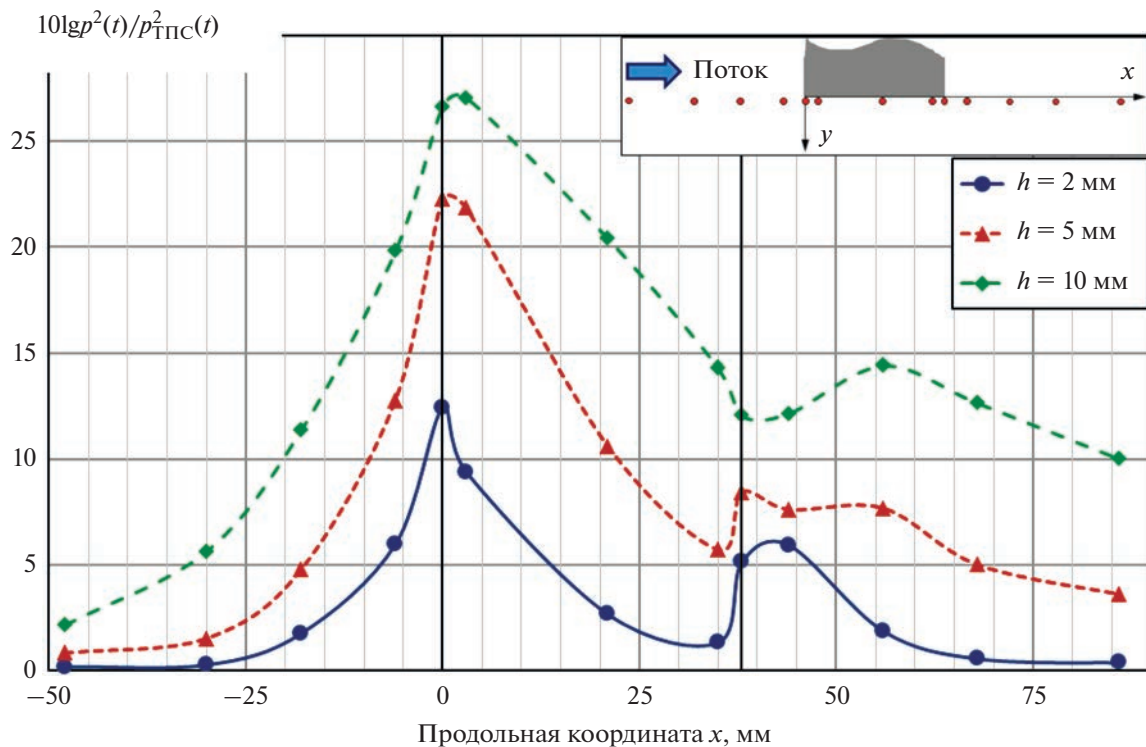


Рис. 2. Логарифм отношения среднего квадрата пульсаций давления в различных точках вблизи выступа к среднему квадрату пульсаций давления в невозмущенном турбулентном пограничном слое.

мерительных точках на расстоянии 1 мм (в поперечном направлении) от боковой кромки выступа и пульсаций давления невозмущенного ТПС (в децибелах). Данные представлены для различных высот выступа. Жирными линиями на рисунке обозначены положения передней и задней кромок выступа. Видно, что максимальные уровни пульсаций достигаются в непосредственной близости от передней кромки выступа, увеличение высоты выступа сопровождается ростом их интенсивности. Так, максимальное превышение над пульсациями давления невозмущенного ТПС увеличивается с 12 дБ при высоте выступа $h = 2$ мм до 27 дБ при $h = 10$ мм. Помимо этого, возрастает размер возмущенной области. При высоте выступа $h = 2$ мм пристеночные пульсации давления практически соответствуют уровням пульсаций давления ТПС на расстоянии 30 мм ($15h$) вверх по потоку от передней кромки и $34h$ вниз по потоку. При высоте выступа 5 мм размер возмущенной зоны перед выступом увеличивается, как минимум, до 48 мм ($9.6h$). Следует отметить, что протяженность возмущенной зоны существенно больше в направлении вниз по потоку от передней кромки, чем в направлении вверх по потоку. Это особенно заметно вблизи уступов высотой 5 и 10 мм.

Приведенные на рис. 2 графики показывают, что областью локального увеличения интенсив-

ности турбулентных пульсаций является также задняя кромка выступа. При этом для выступов высотой 2 и 5 мм характерно увеличение средне-квадратичных уровней пульсаций давления как в непосредственной близости от задней кромки ($x = 38$ мм), так и на некотором удалении от нее. За выступом высотой 10 мм локальное усиление пульсаций также наблюдается, однако этот максимум несколько смещен ниже по потоку. Увеличение интенсивности пристеночных пульсаций давления по мере удаления от кромки вплоть до расстояния порядка 5 высот выступа характерно для поля пульсаций давления за обратным уступом [14]. Данный эффект объясняется постепенным развитием слоя смещения за обратным уступом [30]. Для рассматриваемой линии установки приемников локальное увеличение наблюдается на расстоянии $0-2h$ от задней кромки.

Спектральная плотность мощности пристеночных пульсаций давления в точке максимума (в окрестности передней кромки уступа $x = 0$ мм, $y = 1$ мм) демонстрируется на рис. 3 для различной высоты выступа. Для сравнения приводится спектр пристеночных пульсаций давления невозмущенного ТПС. Форма спектра достаточно слабо зависит от высоты выступа. Наибольшие уровни регистрируются на частотах менее 250 Гц. В этой же частотной области наблюдается наи-

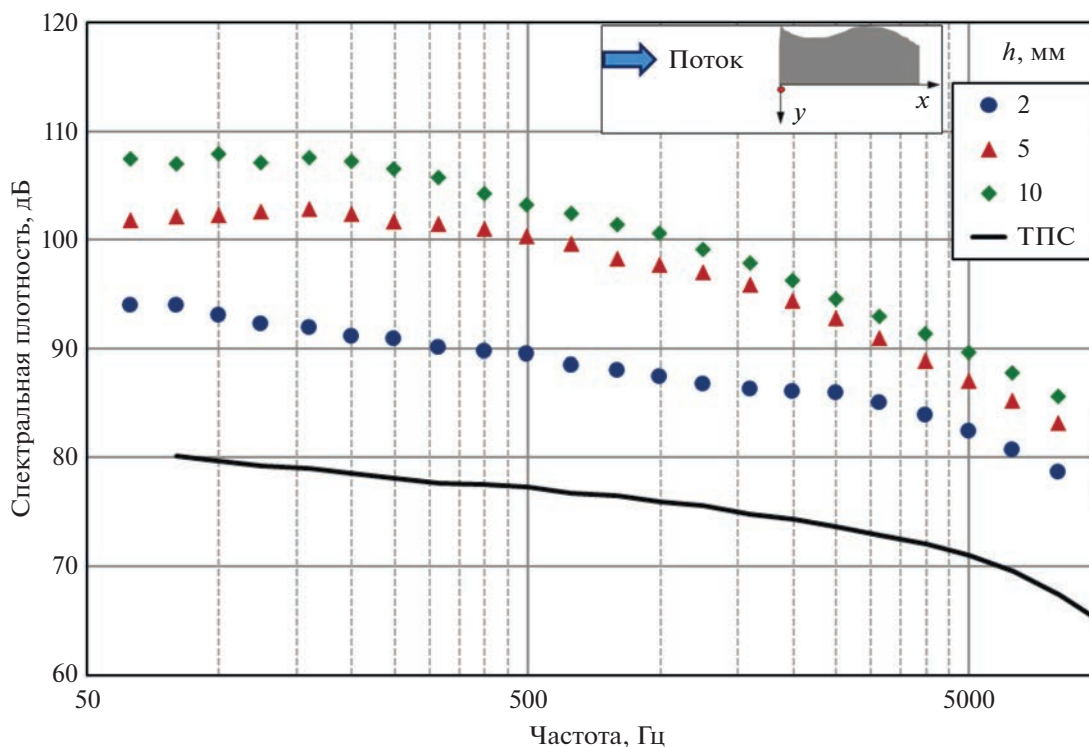


Рис. 3. Влияние высоты выступа на спектральную плотность пульсаций давления вблизи передней кромки; $y = 1$ мм.

большее превышение над спектральной плотностью пульсаций давления ТПС.

Эволюция спектров вверх и вниз по потоку от передней кромки выступа иллюстрируется на рис. 4. Спектральная плотность мощности пристеночных пульсаций давления для различных высот выступа при примерно одной и той же безразмерной координате $x/h \approx -3$ представлена на рис. 4а. Видно, что при данной безразмерной координате спектры практически совпадают для различных значений h . Указанный результат свидетельствует о том, что размер области интенсивных пульсаций давления перед уступом пропорционален высоте выступа. Спектр здесь имеет низкочастотный характер, типичный для отрывных течений [31]. Превышение над уровнями невозмущенного ТПС не превосходит 3 дБ на частотах выше 500 Гц, в то время как на более низких частотах превышение достигает 8–9 дБ.

За передней кромкой выступа (рис. 4б) спектральная плотность пульсаций давления приводится на фиксированном расстоянии $x = 21$ мм. На низких частотах спектральная плотность практически равномерна вплоть до характерной частоты среза, после которой начинается спад интенсивности турбулентных пульсаций по степенной зависимости от частоты. Характерная частота среза равна 500 Гц (при $h = 10$ мм) и 1000 Гц (при $h = 5$ мм), в результате чего характерное число Струхала для обеих высот выступа $St = fh/U = 0.13$.

При данном числе Струхала регистрируется максимальное превышение спектральной плотности пульсаций давления вблизи выступа над уровнями невозмущенного ТПС. При $h = 2$ мм ввиду малости уровней не удастся четко определить частотный диапазон, в котором спектр приблизительно равномерный. Несмотря на это, указанную характерную частоту среза можно определить из условия максимума превышения над ТПС. Из этих соображений получается значение 2500 Гц, которое соответствует числу Струхала $St = 0.13$. Аналогичное значение получается также по характерной частоте среза спектра на меньшем расстоянии от передней кромки. Аналогичное поведение спектров характерно для пульсаций давления на поверхности прямого уступа за его передней кромкой [20], где соответствующее число Струхала лежит в пределах 0.12–0.08 [11]. При более детальном рассмотрении данная характерная безразмерная частота зависит от размера области возвратного течения (т.н. отрывного пузыря) за передней кромкой уступа [21, 22]. Как показано в работе [32], данная частота характерна для образования вихрей в слое смешения между замедленной жидкостью внутри отрывного пузыря и внешним течением. Полученный результат имеет особое значение, ввиду того что именно этой частотой определяется форма спектра за передней кромкой уступа [11].

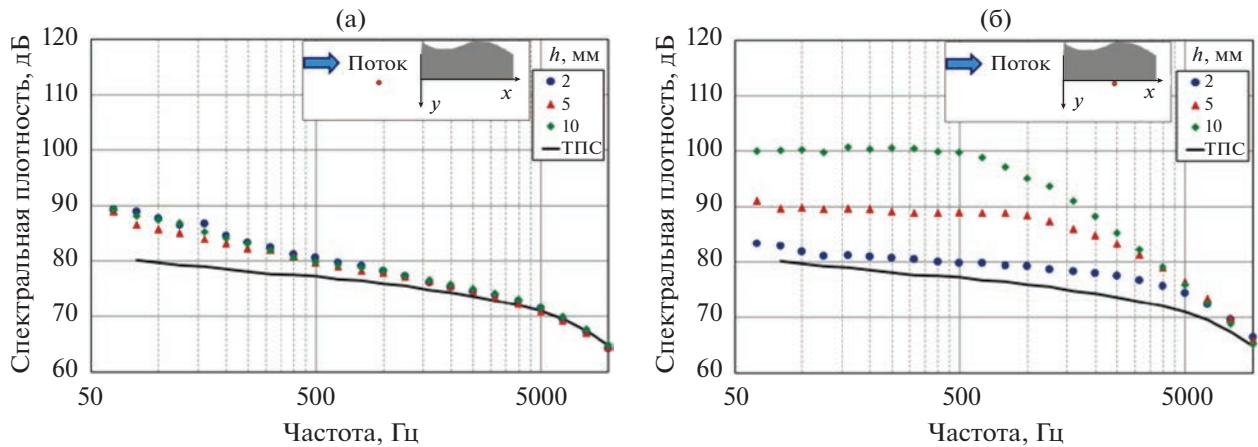


Рис. 4. Спектральная плотность пульсаций давления (а) — вверх и (б) — вниз по потоку от передней кромкой в зависимости от высоты выступа; $y = 1$ мм.

На рис. 5 представлены результаты измерений на различном расстоянии от передней кромки выступа высотой 5 мм вниз по потоку ($x = 21$ мм и более). Как и во всех предыдущих случаях, данные приводятся для поперечного расстояния $y = 1$ мм от боковой кромки. Если исключить из рассмотрения измерительную точку возле задней кромки ($x = 38$ мм), то анализ развития спектров пристеночных пульсаций давления вблизи выступа при дальнейшем удалении от передней кромки показывает, что форма спектра остается подобной той, что получена на расстоянии $x = 21$ мм. Наблюдается лишь уменьшение спектральных уровней и некоторое снижение характерной частоты среза. Аналогичная картина наблюдается на поверхности прямого уступа за его передней кромкой [11], а также за обратным уступом [14]. Вблизи задней кромки выступа ($x = 38$ мм) регистрируются значительные отклонения от описанной зависимости. В данной измерительной точке наблюдается увеличение низкочастотных спектральных уровней вплоть до 6 дБ, а также фиксируется снижение высокочастотных спектральных уровней вплоть до 3 дБ. Сравнение со спектром за задней кромкой выступа (в частности, $x = 86$ мм) показывает, что описанные особенности спектральной плотности имеют локальный характер, низкочастотное возмущение распространяется не дальше 3 высот выступа вниз по потоку от задней кромки.

Рассмотрим изменение спектральных уровней пристеночных пульсаций давления в поперечном направлении, иллюстрируемое на рис. 6. На расстоянии $y/h = 1$ наблюдается некоторое снижение интенсивности низкочастотных пульсаций и повышение высокочастотных (по сравнению с пульсациями давления, регистрируемыми при $y/h = 0.1$). Однако среднеквадратичные уровни пульсаций давления в области $y/h \leq 1$ практиче-

ски постоянны. Дальнейшее удаление от кромки ($y/h = 3$) сопровождается резким снижением спектральной плотности, достигающим 20 дБ в средне-частотной области. При $y/h = 3$ пульсации давления незначительно превышают уровни пульсаций давления ТПС на большей части частотного диапазона, за исключением низких частот.

При решении задач возбуждения вибраций и акустического излучения упругих конструкций под воздействием турбулентных течений жидкости и газа ключевую роль играет пространственно-временная структура поля пристеночных пульсаций давления. Определенное представление о ней можно получить по пространственно-временным корреляционным функциям, которые характеризуют степень взаимосвязи поля пульсаций давления в различных измерительных точках в различные моменты времени.

На рис. 7 представлены корреляционные функции для линейки датчиков для измерительных точек, располагающихся ниже по потоку относительно опорной. Сплошной жирной линией показана экспоненциальная аппроксимация зависимости корреляционного пика от временной задержки в невозмущенном турбулентном пограничном слое. Обработка результатов измерений показывает, что при выборе опорной точки в невозмущенной области перед уступом (рис. 7а) наблюдается значительная корреляция между полем давления в набегающем потоке и в отрывном течении вокруг выступа. Величина корреляции и временная задержка сигнала соответствуют случаю невозмущенного ТПС. Значительная корреляция с набегающим потоком, вероятно, объясняется тем, что в ТПС корреляция на больших расстояниях обусловлена крупными вихрями, движущимися во внешней области пограничного слоя [33]. Отклонение от описанной закономерности наблюдается лишь в зоне наиболее интен-

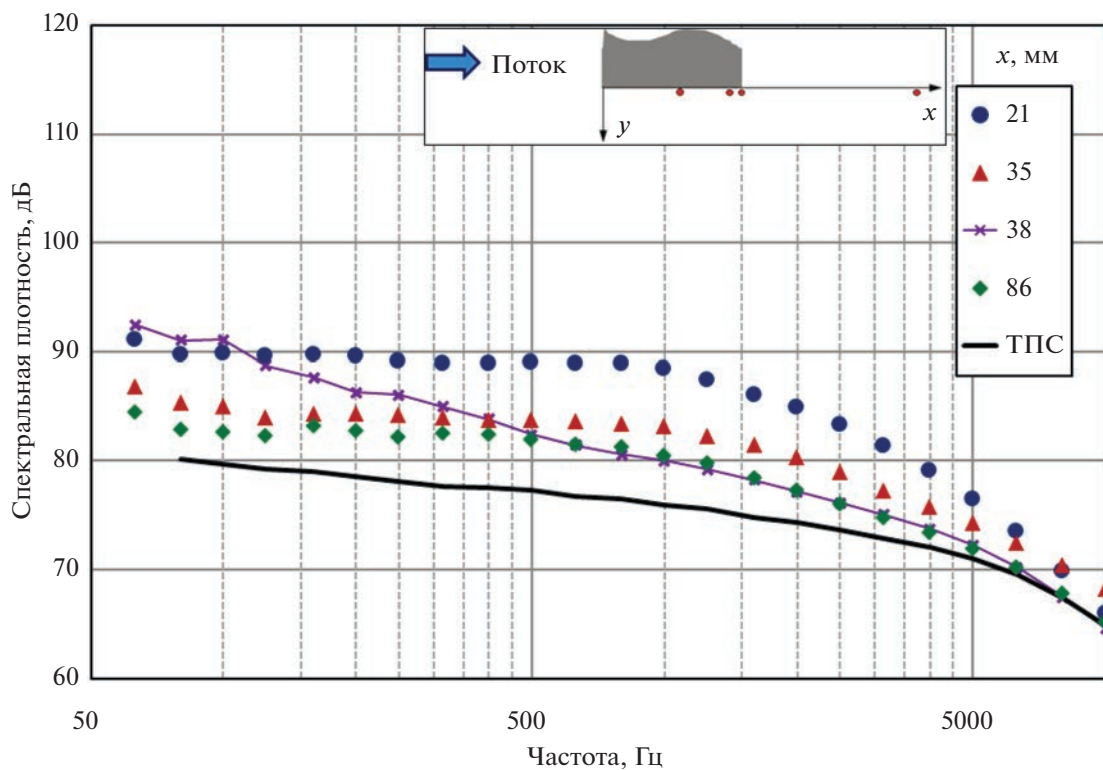


Рис. 5. Эволюция спектральной плотности пульсаций давления вниз по потоку от передней кромки выступа высотой 5 мм; $y = 1$ мм.

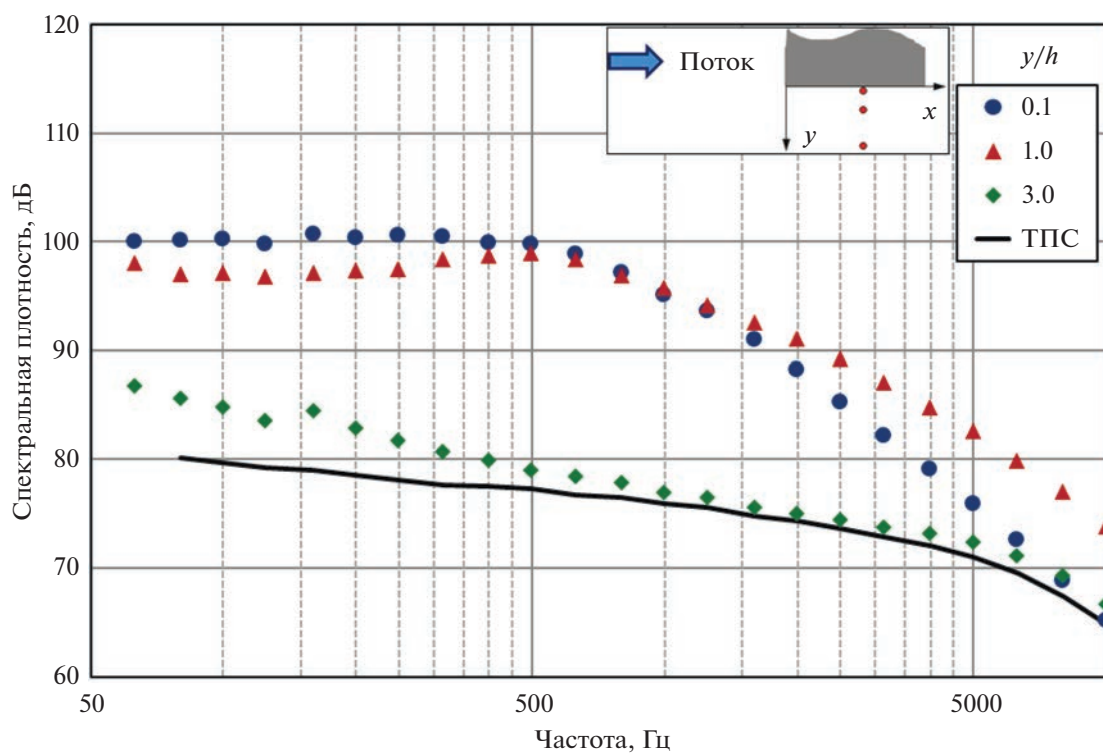


Рис. 6. Изменение спектральной плотности пульсаций давления в поперечном направлении для выступа высотой 10 мм при $x = 21$ мм.

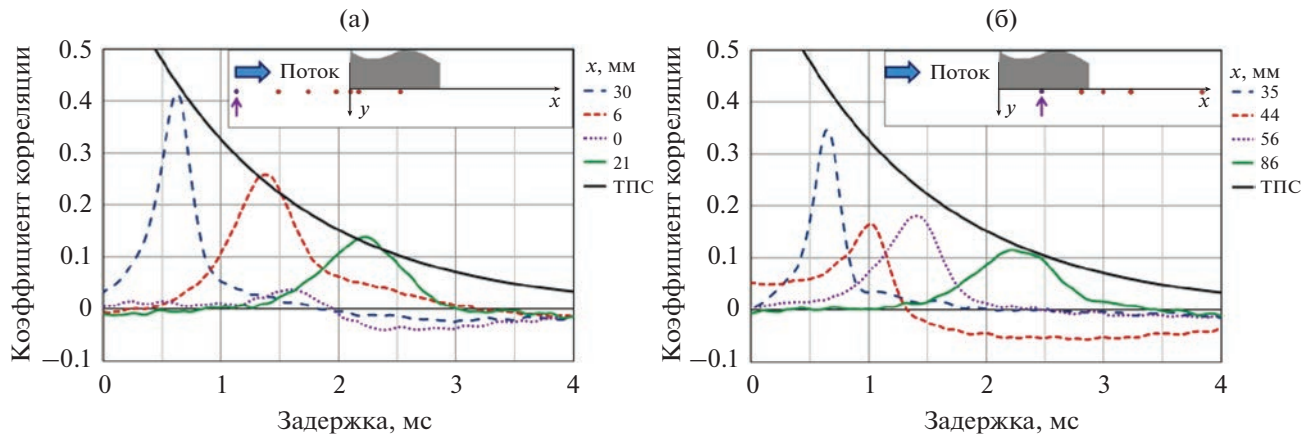


Рис. 7. Пространственно-временные корреляции пульсаций давления с опорной точкой (а) — вверх по потоку, (б) — вниз по потоку от передней кромки выступа высотой 2 мм; $y = 1$ мм.

сивных пульсаций давления в непосредственной близости от передней кромки выступа, где корреляция с набегающим потоком минимальна. В приведенных на рис. 7б данных опорная точка выбрана вблизи боковой кромки выступа. Видно, что возмущенное поле пульсаций давления также обладает конвективными свойствами, о чем свидетельствует пропорциональное увеличению задержки сигнала при удалении измерительной точки от опорной. Конвективная скорость составляет 0.6–0.7 скорости набегающего потока, что характерно для пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое [1, 33]. При этом величина корреляции выходит на невозмущенный уровень только при максимальном удалении от опорного датчика. Можно отметить, что непосредственно за задней кромкой в корреляции проявляется локальное низкочастотное возмущение, корреляция с опорной точкой снижается.

Рассмотрим влияние высоты выступа на пространственно-временную структуру поля пульсаций давления, показанное на рис. 8. Корреляция между пульсациями давления перед выступом ($x = -6$ мм) и полем давления вблизи боковой кромки при $x = 21$ мм (рис. 8а) снижается по мере уменьшения высоты выступа, что свидетельствует о постепенном исчезновении взаимосвязи с набегающим потоком. В то же время возникает альтернативный пик отрицательной корреляции со значительно большей временной задержкой, соответствующей скорости распространения возмущения, равной 0.4 скорости набегающего потока. Отрицательная корреляция свидетельствует о том, что пульсации давления в области отрыва вблизи передней кромки находятся в противофазе с пульсациями вниз по потоку. При перемещении опорной точки в область максимальных уровней пульсаций давления вблизи кромки при $x = 0$ мм (рис. 8б) снижается величина положи-

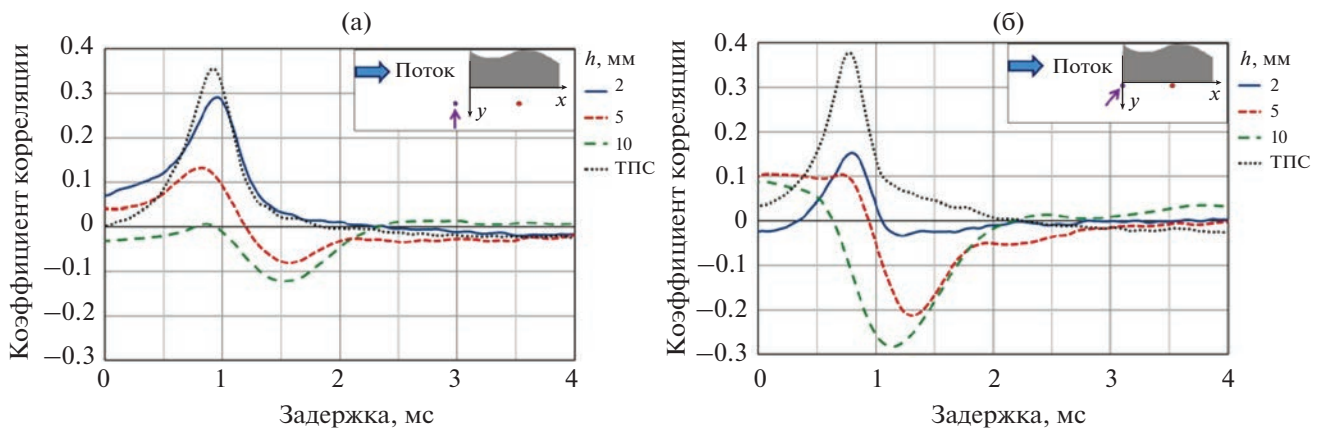


Рис. 8. Влияние высоты выступа на корреляцию между пульсациями давления (а) — вверх и вниз по потоку от передней кромки, (б) — вблизи передней кромки выступа и за ней.

тельного пика при $h = 2$ и 5 мм и возрастает величина отрицательного при $h = 5$ и 10 мм. Это свидетельствует о значительном сокращении вклада набегающего ТПС в корреляцию поля давления, а также о существенном изменении пространственно-временной структуры поля пульсаций давления по мере увеличения высоты выступа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования особенностей поля пристеночных пульсаций давления вблизи боковой кромки выступов различной высоты. Измерения проводились в толстом (по сравнению с высотой выступов) турбулентном пограничном слое.

Результаты измерений демонстрируют, что даже в случае уступа высотой 2 мм (0.03 толщины пограничного слоя) наблюдается значительное (на 13 дБ) увеличение интенсивности пульсаций давления вблизи передней кромки выступа. При увеличении высоты до 10 мм (0.17 толщины пограничного слоя) превышение среднеквадратичного уровня мощности пульсаций давления над уровнем пульсаций давления невозмущенного турбулентного пограничного слоя достигает 27 дБ.

Область интенсивных пристеночных пульсаций давления существенно зависит от высоты выступа. Ее протяженность составляет порядка 3 высот выступа вверх по потоку от передней кромки и 1 высоты выступа в поперечном (относительно потока) направлении. В направлении вниз по потоку от передней кромки возмущения распространяются на значительно большие расстояния, особенно в случае выступов большой высоты. В этой пространственной области спектральная плотность пульсаций давления определяется характерным числом Струхала $fh/U = 0.13$.

Пространственно-временная структура поля пристеночных пульсаций давления существенно зависит от высоты выступа. При малой высоте выступа наблюдается значительная корреляция с пульсациями давления набегающего пограничного слоя, которая падает с ростом высоты. Наблюдается конвективный перенос возмущений со скоростью 0.6 – 0.7 скорости набегающего потока. При большой высоте уступа ситуация меняется и на первый план выходит корреляция поля давления, обусловленная формированием возмущений в отрывном течении вокруг выступа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект 21-71-30016. Отработанная методика измерения пульсаций давления предполагает в дальнейшем использование на базе УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ ЦАГИ, модернизируемой при поддержке Министерства науки и высшего обра-

зования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-1036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимцов Б.М. Характеристики поля пристеночных пульсаций давления при больших числах Рейнольдса // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 4. С. 491–497.
2. Ефимцов Б.М. Критерии подобия спектров пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 1. С. 58–61.
3. Смольяков А.В., Ткаченко В.М. Модели поля псевдозвуковых турбулентных пристеночных давлений и опытные данные // Акуст. журн. 1991. Т. 36. № 6. С. 1199–1207.
4. Howe M.S. Surface pressures and sound produced by turbulent flow over smooth and rough walls // J. Acoust. Soc. Am. 1991. V. 95. P. 1041–1047.
5. Зверев А.Я., Ефимцов Б.М. Сравнительная оценка акустического излучения тонкостенных конструкций, возбуждаемых турбулентным пограничным слоем, для различных представлений взаимного спектра // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 459–464.
6. Haxter S., Spehr C. Comparison of model predictions for coherence length to in-flight measurements at cruise conditions // J. Sound Vib. 2017. V. 390. P. 86–117.
7. Blake W.K. Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration. V. 2. Complex Flow-Structure Interactions. Second Edition. Academic Press, 2017. Elsevier Inc. 670 p.
8. Голубев А.Ю., Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. Турбулентные пульсации давления в акустике и аэродинамике. М.: Физматлит, 2019.
9. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. Развитие экспериментальных исследований турбулентных пристеночных пульсаций давления. Критический анализ и обобщение накопленных опытных данных // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 639–649.
10. Flinovia: Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-III / Eds. Ciappi E., De Rosa S., Franco F., Hambric S.A., Leung R.C.K., Clair V., Maxit L., Tottaro N. Springer: Nature, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64807-7>
11. Awasthi M., Devenport W.J., Glegg S.A.L., Forest J.B. Pressure fluctuations produced by forward steps immersed in a turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. 2014. V. 756. P. 384–421.
12. Farabee T.M., Casarella M.J. Measurements of fluctuating wall pressure for separated/reattached boundary layer flows // ASME J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des. 1986. V. 108. P. 301–307.
13. Efimtsov B.M., Kozlov N.M., Kravchenko S.V., Anderson A.O. Wall Pressure Fluctuation Spectra at Small Forward-Facing Steps // AIAA Paper. 1999. 99–1964.
14. Efimtsov B.M., Kozlov N.M., Kravchenko S.V., Anderson A.O. Wall Pressure Fluctuation Spectra at Small Backward-Facing Steps // AIAA Paper. 2000. 2000–2053.

15. *Lee I., Sung H.J.* Multiple-arrayed pressure measurement for investigation of the unsteady flow structure of a reattaching shear layer // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 463. P. 377–402.
16. *Largeau J.F., Moriniere V.* Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward-facing step // *Exp. Fluids.* 2007. V. 42. P. 21–40.
17. *Camussi R., Felli M., Pereira F., Aloisio G., Di Marco A.* Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step // *Phys. Fluids.* 2008. V. 20. № 7. P. 75113.
18. *Ji M., Wang M.* Surface pressure fluctuations on steps immersed in turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2012 V. 712. P. 471–504.
19. *Бибко В.Н., Голубев А.Ю.* Основные закономерности влияния скоса потока на характеристики полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступом // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 5. С. 483–491.
20. *Голубев А.Ю., Кузнецов С.В.* Особенности полей пульсаций давления на поверхности выступов // *Известия РАН. МЖГ.* 2018. № 6. С. 67–75.
21. *Awasthi M., Devenport W.J., Alexander W.N., Glegg S.A.L.* Aeroacoustics of rounded forward-facing steps: near-field behavior // *AIAA Journ.* 2019. V. 57. № 3. P. 1237–1249.
22. *Golubev A., Kuznetsov S.* Wall pressure fluctuations on the surface of sloped forward-facing steps // *AIAA Journ.* 2020. V. 58. № 10. P. 4595–4599.
23. *Leclercq D.J.J., Jacob M.C., Louisot A., Talotte C.* Forward-Backward Facing Step Pair: Aerodynamic Flow, Wall Pressure and Acoustic Characterisation // *AIAA Paper.* 2001. 2001-2249.
24. *Голубев А.Ю., Ефимцов Б.М.* Особенности структуры полей пульсаций давления в окрестности выступов // *Известия РАН. МЖГ.* 2015. № 1. С. 55–66.
25. *Голубев А.Ю., Ефимцов Б.М.* Взаимная корреляция полей пристенных пульсаций давления перед конфигурацией “прямой уступ–обратный уступ” и в следе за ней // *Ученые записки ЦАГИ.* 2015. Т. 46. № 1. С. 30–41.
26. *Голубев А.Ю.* Особенности полей пульсаций давления в окрестности конфигурации “прямой уступ–обратный уступ” // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 1. С. 56–62.
27. *Pearson D.S., Goulart P.J., Ganapathisubramani B.* Turbulent separation upstream of a forward-facing step // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 724. P. 284–304.
28. *Graziani A., Kerherve F., Martinuzzi R.J., Keirsbulck L.* Dynamics of the recirculating areas of a forward-facing step // *Exp. Fluids.* 2018. V. 59. № 154. P. 1–18.
29. *Fang V., Tachie M.F.* Spatio-temporal dynamics of flow separation induced by a forward-facing step submerged in a thick turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* 2020 V. 892. A40-1-30.
30. *Chandrsuda C., Bradshaw P.* Turbulence structure of a reattaching mixing layer // *J. Fluid Mech.* 1981. V. 110. P. 171–194.
31. *Simpson R.L., Ghodbane M., McGrath B.E.* Surface pressure fluctuations in a separating turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* 1987. V. 177. P. 167–186.
32. *Kiya M., Sasaki K.* Structure of a turbulent separation bubble // *J. Fluid Mech.* 1983. V. 137. P. 83–113.
33. *Haxter S., Brouwer J., Sesterhenn J., Spehr C.* Obtaining phase velocity of turbulent boundary layer pressure fluctuations at high subsonic Mach number from wind tunnel data affected by strong background noise // *J. Sound Vib.* 2017. V. 402. P. 85–103.