

АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШУМОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ И КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ В УЗКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

© 2023 г. В. Ф. Копьев^а, *, О. П. Бычков^а, В. А. Копьев^а, Г. А. Фараносов^а,
И. А. Моралев^б, П. Н. Казанский^б

^аФАУ ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ,
ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

^бФГБУ ОИВТ РАН, ул. Ижорская 17, стр. 2, Москва, 125112 Россия

*e-mail: vkopiev@mktsagi.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Для струи, расположенной вблизи крыла, рассеяние на его задней кромке волн неустойчивости, развивающихся в слое смещения струи, приводит к генерации значительного шума. В работе экспериментально исследована возможность снижения данного шума за счет активного подавления естественных волн неустойчивости. Активная система управления состоит из микрофонов ближнего поля, с которых снимается сигнал обратной связи, модуля фильтровой обработки сигнала и плазменного актуатора на основе высокочастотного диэлектрического барьерного разряда. Показано, что снижение возмущений давления в ближнем поле турбулентной струи, связанных с осесимметричными волнами неустойчивости, в узкой полосе частот приводит к соответствующему снижению шума в дальнем поле.

Ключевые слова: турбулентная струя, шум взаимодействия струи и крыла, волны неустойчивости, активное управление

DOI: 10.31857/S0320791922600524, **EDN:** ITIMBG

ВВЕДЕНИЕ

Двигатель остается одним из наиболее значимых источников шума на местности для гражданских воздушных судов. Двигатели нового поколения, используемые на современных магистральных самолетах, обычно имеют высокие или сверхвысокие степени двухконтурности и соответственно больший диаметр, так что они расположены довольно близко к крылу самолета [1]. Хорошо известно [1–9], что шум струи, расположенной вблизи крыла (так называемой “струи в компоновке”), может значительно отличаться от шума свободной струи. В частности, на низких и умеренных частотах возникает дополнительный эффективный источник шума, связанный с взаимодействием между гидродинамическим ближним полем струи и задней кромкой крыла [4, 5, 10, 11].

Для снижения шума взаимодействия струи и крыла можно использовать несколько подходов. Наиболее популярные методы связаны с модификацией геометрии сопла и/или модификацией крыла/закрылков [1, 3, 4, 6, 12]. Однако изменение базовой геометрии системы “сопло–крыло”

может приводить к ухудшению аэродинамических характеристик на крейсерском режиме полета, что является нежелательным. Поэтому разработка технологий шумоподавления, не требующих изменений геометрии, является актуальной задачей. Одной из возможностей для реализации такого подхода является использование активных систем управления потоком.

В то время как проблема активного управления шумом свободных струй имеет достаточно богатую историю [13–22], шум взаимодействия лишь недавно стал рассматриваться с этой точки зрения [23]. Недавние исследования [4, 8, 10, 11] показали, что значительное усиление шума на низких и средних частотах, наблюдаемое для струй в компоновке, связано с рассеянием пульсаций давления ближнего поля струи на задней кромке крыла. Эти пульсации ассоциируются с волнами неустойчивости, развивающимися в слое смещения струи [23–25], поэтому задача снижения шума взаимодействия струи и крыла может быть сформулирована как задача управления волнами неустойчивости [23, 26]. Такой подход позволяет использовать способы управления

волнами неустойчивости, разработанные для свободных струй [19, 21].

Применительно к свободным струям в работах [27, 28] развита теоретическая база активного управления волнами неустойчивости в слое смешения струи, в рамках которой подавление волны неустойчивости на заданной частоте достигается за счет деструктивной интерференции между волной неустойчивости, которую требуется ослабить, и управляющей волной, которая создается внешним контролируемым источником (wave cancellation). Отметим, что аналогичные подходы достаточно давно используются в задачах управления возмущениями в пограничных слоях [29].

Предложенная концепция активной системы подавления волн неустойчивости в свободной струе далее была реализована с помощью плазменных актуаторов в маломасштабных экспериментах как для тонально возбужденных струй, в которых волны неустойчивости на частоте возбуждения носят детерминированный характер [19], так и для невозбужденных струй, где волны неустойчивости являются стохастическими [22]. При этом, поскольку волны неустойчивости в дозвуковых струях не являются значимыми источниками звука [30], снижение их интенсивности в свободной струе не приводит к снижению шума в дальнем поле [22].

В работе [26] аналогичный подход к управлению был проверен в эксперименте для возбужденных дозвуковых струй вблизи пластины, моделирующей крыло. Было показано, что при подавлении волны неустойчивости наблюдается соответствующее снижение шума взаимодействия струи и крыла на этой частоте.

Настоящая работа является продолжением работ [22, 26] и посвящена реализации концепции управления шумом взаимодействия струи и крыла для невозбужденной струи. Как и в работах [22, 26], для создания управляющих возмущений используется плазменный актуатор на основе высокочастотного диэлектрического барьерного разряда (ВЧ ДБР). Подобные актуаторы хорошо зарекомендовали себя в качестве генератора контролируемых возмущений в течениях различного типа: пограничных слоях [31], турбулентных струях [19], отрывных течениях [32–34].

В работе представлены результаты измерений пульсаций давления в ближнем поле и акустических возмущений вдали от струи как без управления, так и с включенной системой активного подавления волны неустойчивости. В узкой полосе частот продемонстрирован эффект подавления естественных возмущений в струе и в звуковом поле рассеяния.

1. СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Основная идея управления шумом взаимодействия струи крыла основана на предположении о доминирующей роли волн неустойчивости в процессе генерации этого шума [4, 5, 8, 10, 11]. В работах [10, 11] было показано, что если задняя кромка крыла лежит в потенциальной части ближнего поля струи (вне слоя смешения), то задача моделирования низкочастотного шума взаимодействия может быть решена в линейном приближении. В этом случае для каждой частоты существует линейная передаточная функция между гидродинамическими пульсациями ближнего поля струи, падающими на заднюю кромку крыла, и звуком в дальнем поле, вызванным рассеянием этих пульсаций на кромке. Применительно к круглой струе возмущения ближнего поля представляются в виде суперпозиции азимутальных гармоник порядка m [10, 11] и тогда для каждой гармоники можно записать

$$p'_m(\mathbf{R}, \omega) = F_m(\mathbf{R}, \omega) p_m(\omega), \quad (1)$$

где p_m — пульсации давления m -й азимутальной моды в месте расположения задней кромки, p'_m — акустическое давление в дальнем поле в точке $\mathbf{R}$, обусловленное рассеянием m -й азимутальной моды ближнего поля, и F_m — соответствующая передаточная функция между ними. Подробное описание функций, входящих в (1), можно найти в работах [10, 11]. Значение p'_m определяется, главным образом, пакетами волн неустойчивости соответствующего азимутального порядка, развивающимися за счет неустойчивости слоя смешения струи. В работах [10, 11] показано, что в шум взаимодействии вносят основной вклад две первые азимутальные моды ближнего поля, причем их вклад сравним друг с другом и передаточные функции для них практически одинаковы $F_1 \approx F_0 \equiv F$. Поэтому подавление волн неустойчивости порядков $m = 0$ и/или $m = 1$ должно приводить к значимому снижению шума взаимодействия струи и крыла. В работе [26] этот эффект был подтвержден для искусственно возбужденных осесимметричных волн неустойчивости путем их подавления с использованием кольцевого плазменного актуатора, расположенного вблизи кромки сопла.

Целью настоящей работы является реализация указанного подхода для невозбужденных струй, в которых волны неустойчивости реализуются в виде стохастических волновых пакетов в сдвиговом слое струи. Предполагается, что эволюция этих пакетов происходит в соответствии с линейной теорией устойчивости, и в узких полосах частот динамические свойства естественных волн неустойчивости в среднем подобны свойствам детерминированных искусственно возбужденных

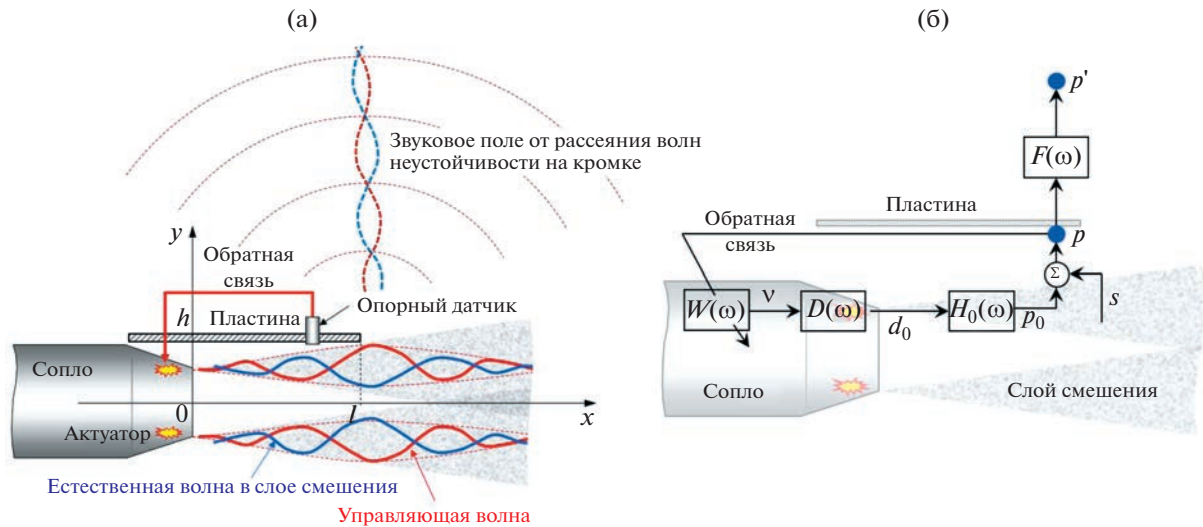


Рис. 1. Концепция управления шумом взаимодействия струи и пластины: (а) — общая идея; (б) — блок-схема системы управления.

волн, однако их мгновенные характеристики (фазовая скорость возмущений, пространственная огибающая пакета) являются случайными, хотя и относительно медленно меняющимися, функциями времени. Это обстоятельство осложняет реализацию системы управления, поскольку требует постоянной подстройки управляющего воздействия под “актуальные” характеристики возмущения, которое требуется погасить. В работе [22] соответствующая задача применительно к управлению волнами неустойчивости в узкой полосе частот в свободной струе была решена путем введения в систему управления обратной связи, использующей в качестве входных данных сигналы с микрофонов, расположенных вблизи границы струи, и на основе линейного алгоритма генерирующей управляющий сигнал на актуаторе.

В данной работе предлагается использовать аналогичную концепцию применительно к системе “сопло—пластина” (рис. 1), являющейся простейшей моделью системы “крыло—двигатель”. При линейной связи (1) волн неустойчивости в струе со звуковым полем, возникающим от их рассеяния на кромке пластины, подавление волн неустойчивости в ближнем поле струи должно приводить к пропорциональному ослаблению шума взаимодействия (рис. 1а). Таким образом, целью управления является ослабление возмущений ближнего поля вблизи задней кромки пластины. Это означает, что опорный датчик (или датчики) для формирования обратной связи должен располагаться в окрестности кромки пластины (рис. 1а), т.к. в работе [22] было показано, что максимальный эффект управления достигается именно в области расположения опорных датчиков вследствие потери когерентности естествен-

ных волновых пакетов [22]. Предварительные результаты по управлению шумом взаимодействия в невозбужденной струе были представлены в работе [35].

На рис. 1б представлена блок-схема системы управления с обратной связью. Предполагается, что все части системы линейны, и ее поведение можно рассмотреть в частотной области. Наличие обратной связи предполагает, что сигнал p , измеренный опорным датчиком, после некоторых преобразований подается обратно на вход системы. Преобразования заключаются в коррекции фазы и амплитуды сигнала на данной частоте и описываются передаточной функцией $W(\omega)$, соответствующей, по существу, линейному регулируемому фильтру. На выходе фильтра формируется сигнал

$$v = W(\omega)p, \quad (2)$$

который модулирует напряжение на актуаторе. Разряд, создаваемый кольцевым актуатором, в свою очередь, генерирует гармоническую, преимущественно осесимметричную, волну неустойчивости в слое смешения струи с начальной амплитудой

$$d_0 = D(\omega)v, \quad (3)$$

где функция $D(\omega)$ описывает восприимчивость слоя смешения к генерируемому разрядом гидродинамическим возмущениям, а также процессы в источнике питания актуатора и в разряде. Волна неустойчивости, распространяясь вниз по потоку, создает на опорном датчике возмущения

$$p_0 = H_0(\omega)d_0, \quad (4)$$

где передаточная функция $H_0(\omega)$ описывает линейную эволюцию волны неустойчивости от

кромки до датчика. На опорном датчике также регистрируется сигнал s , связанный со случайными возмущениями, присутствующими в ближнем поле струи. Предполагается, что на низких и умеренных частотах сигнал s практически полностью определяется естественными волнами неустойчивости в струе [11, 23, 24], а именно, суммой осесимметричной моды $m = 0$ и моды $m = 1$. Таким образом, вблизи кромки суммарные пульсации равны

$$p = p_0 + s. \quad (5)$$

Передаточная функция системы с замкнутой обратной связью запишется как

$$G(\omega) = \frac{1}{1 - H_0 D W}. \quad (6)$$

Из уравнения (1) следует, что задача минимизации шума в дальнем поле, как уже отмечалось выше, эквивалентна задаче минимизации интенсивности пульсаций ближнего поля вблизи заданной кромки, т.е. минимизации величины S_{pp} , являющейся автоспектром сигнала (5). Из системы уравнений (2)–(5) имеем для автоспектров сигналов p и s следующую связь

$$S_{pp} = |G|^2 S_{ss}. \quad (7)$$

В данной работе целью управления являлась минимизация мощности сигнала на заданной частоте ω_0 . Выделив явно модули и фазы функций $H_0(\omega)D(\omega) \equiv A(\omega) = a(\omega)e^{-i\alpha(\omega)}$, $W(\omega) = w(\omega)e^{-i\delta(\omega)}$ и введя обозначение $\varepsilon = aw$, получим из (6)

$$S_{pp} = \frac{S_{ss}}{1 - 2\varepsilon \cos(\alpha + \delta) + \varepsilon^2}. \quad (8)$$

Можно видеть, что в отсутствие шумов, эффектов нелинейности, насыщения и т.п., глубина подавления возмущений на данной частоте определяется лишь устойчивостью системы. Отметим, что при этом не налагается никаких априорных требований на сигнал s . При заданном значении коэффициента усиления ε минимизация интенсивности пульсаций на данной частоте, согласно (7), будет достигаться при $\delta = -\alpha + \pi$. В этом случае $p = s/(1 + \varepsilon)$ и $p_0 = -\varepsilon s/(1 + \varepsilon)$, т.е. созданные актуатором возмущения p_0 будут находиться в противофазе с естественными возмущениями s , как этого и следовало ожидать из общих соображений.

На данном этапе работы исследовалась принципиальная возможность контролируемого изменения уровня шума в узкой полосе частот вблизи заданной центральной частоты ω_0 , и измерения проводились по упрощенной процедуре.

Алгоритм обработки, определяющий функцию $W(\omega)$, включал в себя фильтрацию сигнала с

помощью узкополосного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) [36], которому соответствует передаточная функция вида $W(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k e^{-i\omega k / f_s}$, где f_s – частота дис-

кретизации, $b_k = r / N e^{i2\pi \frac{l}{N-1} k + i\varphi}$ – коэффициенты узкополосного фильтра, с центральной частотой $\omega_l = 2\pi f_s l / (N - 1)$, r – действительное число, определяющее общее усиление в канале обратной связи, φ – фазовый сдвиг, который выбирался исходя из требования общего сдвига фазы на π в центре полосы пропускания, чтобы обеспечить приход искусственных возмущений в точку измерения в противофазе с естественными.

Устойчивость системы (6) можно оценить, положив для простоты $D(\omega) = 1$, $H(\omega) = h e^{-i\Delta}$, где h характеризует усиление волны неустойчивости в сдвиговом слое, а Δ – гидродинамическую задержку возмущений. Тогда для передаточной функции системы получим оценку

$$G(\omega) = \left(1 + \frac{\varepsilon}{N} \sum_{n=\lambda}^{N-1+\lambda} \hat{z}_k^{-n} \right)^{-1}, \quad \hat{z} = e^{i(\omega_k - \omega_0) / f_s}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = hr$ – полный коэффициент связи, λ – целое положительное число, определяющее наклон гидродинамической задержки $\Delta(\omega)$.

Система (9) устойчива в случае, если все полюсы ω_p функции G лежат в верхней части комплексной плоскости (соответственно, все полюсы $\hat{z}_p$ лежат внутри круга единичного радиуса). Моделирование было выполнено для параметров, близких к тем, что реализованы в эксперименте (см. разделы 2, 3): $N = 128$, $l = 8$, $f_s = 10^4$ Гц. Приняв скорость конвекции возмущений в слое смещения равной 60% от скорости струи, составляющей в данной работе 137 м/с, а расстояние между актуатором и датчиков равным 0.025 м, получим $\lambda = 3$. Исследование поведения корней $\hat{z}_p$ характеристического уравнения $G^{-1} = 0$ показывает, что система устойчива при $\varepsilon < 26$.

На рис. 2 показана амплитудная передаточная характеристика системы (величина $|G|^2$ в дБ) при различных коэффициентах связи. При коэффициенте связи вблизи границы устойчивости теоретическое подавление для данного фильтра и выбранных параметров системы составляет около 28 дБ, при этом наблюдается сопутствующее усиление сигнала справа и слева от полосы подавления. Это явление связано с особенностью фазовой характеристики КИХ-фильтра: временная задержка, присущая системе управления с обратной связью, приводит к ненулевому наклону фазовой характеристики фильтра, вследствие чего по обеим сторонам от центральной частоты по-

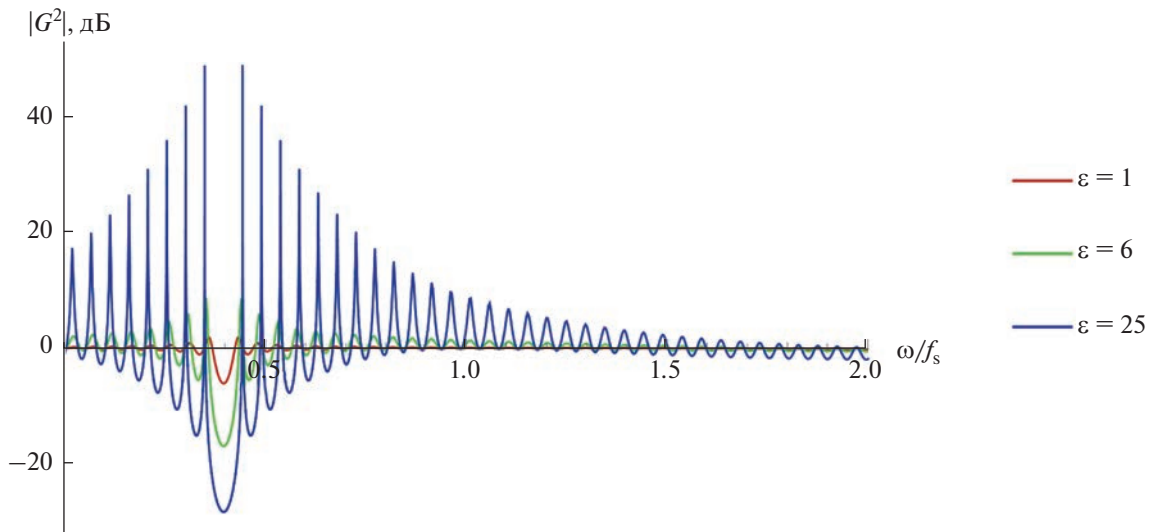


Рис. 2. Модельная передаточная характеристика системы при различных полных коэффициентах связи.

являются зоны, в которых фаза сдвигается на величину π , а значит, эффект управления инвертируется. Экспериментальная реализация системы управления описана в следующем разделе.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Использовалось коническое сопло с выходным диаметром $D = 50$ мм. Число Маха истечения струи составляло $M = 0.4$ (скорость около 137 м/с), число Рейнольдса по диаметру сопла и скорости истечения — $Re = 4.7 \times 10^5$. Крыло моделировалось плоской алюминиевой прямоугольной пластиной размерами $1.2 \times 0.35 \times 0.003$ м. Пластина была расположена параллельно оси струи так, что координаты ее задней кромки в плоскости симметрии системы составляли $l = 1.6D$, $h = 0.88D$ (рис. 1а).

Для генерации волн неустойчивости использовался актуатор высокочастотного диэлектрического барьерного разряда (ВЧ ДБР), установленный на внутренней поверхности сопла вблизи его кромки аналогично тому, как это было сделано в работе [22]. Использовались металлические сопла, покрытые алундовой керамикой толщиной 1 мм (рис. 3). Разряд создавался по краям металлического кольцевого электрода, наклеенного на внутреннюю поверхность сопла, а само сопло при этом служило вторым электродом (рис. 3б). Расстояние от кромки электрода до плоскости среза сопла составляло $l \approx 2-3$ мм (рис. 3), что обеспечивало достаточно высокую эффективность генерации волн неустойчивости.

Для измерения пульсаций использовалось пять 1/2" микрофонов Bruel & Kjaer типа 4189 в дальнем поле (далее обозначаются как $F1-F5$) и

пять 1/4" микрофонов Bruel & Kjaer типа 4935 в ближнем поле (далее обозначаются как $N1-N5$). Фотография экспериментальной установки и схема расположения микрофонов ближнего и дальнего поля показаны на рис. 4. Микрофоны дальнего поля были расположены на дуге радиусом $R = 24D$, которая была центрирована на задней кромке пластины. Два микрофона ($F1$ и $F2$) были расположены в точках, симметричных относительно пластины, под углом $\theta = 120^\circ$ к направлению потока для того, чтобы контролировать симметричность низкочастотного излучения, которая должна иметь место при рассеянии гидродинамических возмущений на задней кромке [5, 10, 11]. Микрофоны $F3$, $F4$, $F5$ располагались под углами $\theta = 90^\circ$, 60° , 30° соответственно. В ближнем поле четыре микрофона ($N1-N4$) были установлены в плоскости симметрии струи, параллельной пластине, в двух поперечных сечениях струи, микрофон $N5$, с которого брался опорный сигнал для системы управления, был установлен заподлицо в пластине на удалении $1.1D$ от ее задней кромки. Такое размещение опорного датчика несколько выше по потоку от кромки пластины было выбрано с целью уменьшения гидродинамической задержки и снижения влияния на сигнал рассеянного на кромке поля. Координаты микрофонов ближнего поля, обезразмеренные на диаметр сопла, в системе координат (x, y, z) , показанной на рис. 4б, приведены в таблице.

С целью определения базового уровня шума на микрофонах $F1-F5$ проводились вспомогательные измерения шума изолированной струи (без пластины).

Система управления в целом была аналогична той, которая использовалась в работе [22] для

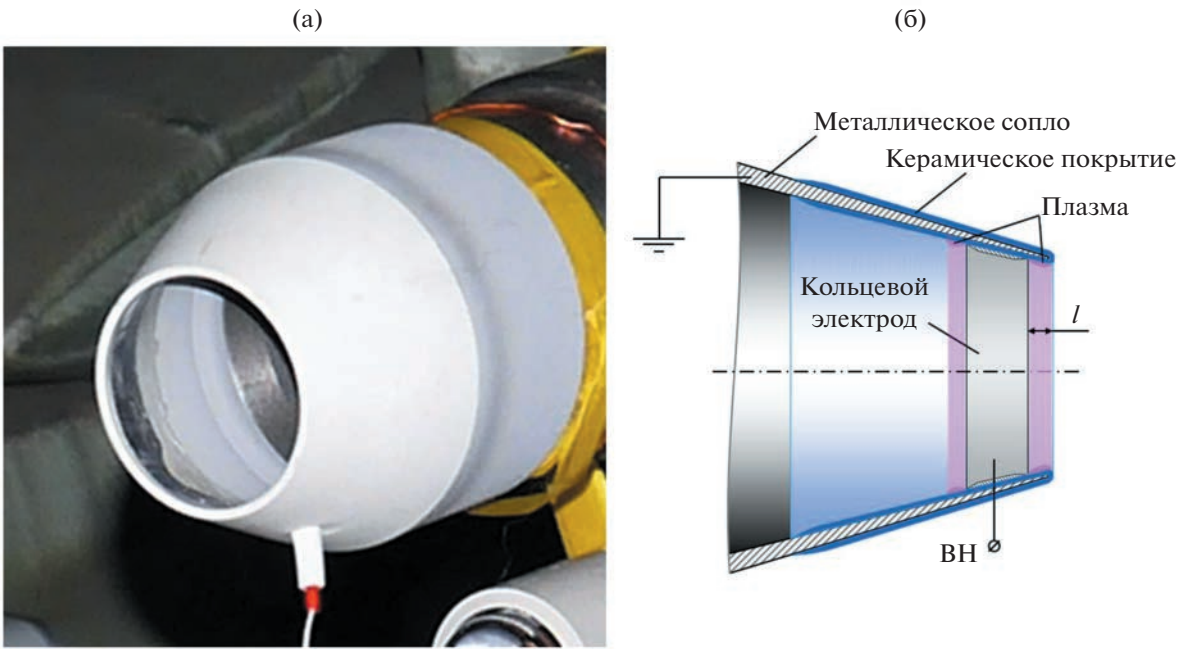


Рис. 3. Сопло с актуатором: (а) – фото; (б) – схема сопла в разрезе.

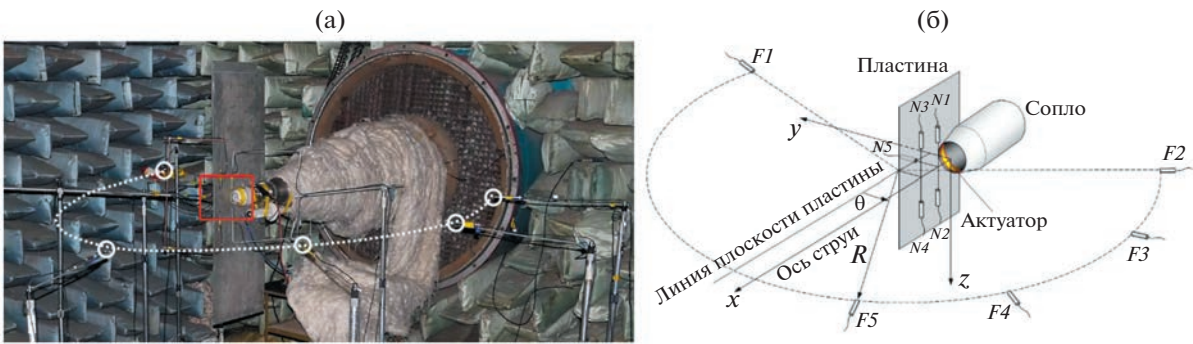


Рис. 4. (а) – Фотография экспериментальной установки в заглушенной камере АК-2, белыми маркерами отмечено расположение 5 микрофонов дальнего поля, красной рамкой отмечена область ближнего поля; (б) – схема расположения микрофонов в ближнем и дальнем поле струи.

свободных струй. Она была реализована на базе модуля LCARD E14-440D, объединяющего аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и цифровой сигнальный процессор (ЦСП) ADSP-2185M с тактовой частотой 48 МГц, микроконтроллер для

управления модулем и передачи данных через порт USB.

Таблица коэффициентов фильтра (9) загружалась в память модуля. Для ее замены производилась остановка АЦП и ЦАП. Фильтр использовал каждый 10-й отсчет АЦП, работающего с частотой 100 кГц на канал. Выходной сигнал, генерируемый с помощью ЦАП, использовался для модуляции частоты питающего напряжения. Высокое напряжение создавалось источником питания на основе транзисторных ключей с резонансным трансформатором в выходном каскаде. В результате модуляции частоты на правой ветви резонансной кривой выходного трансформатора ВЧ генератора напряжение питания разряда модулируется (уже на звуковых частотах) пропорцио-

Таблица 1. Координаты микрофонов ближнего поля

№ микр.	N1	N2	N3	N4	N5
x/D	0.4	0.4	1.7	1.7	0.5
y/D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.88
z/D	-0.8	0.8	-0.98	0.98	0.0

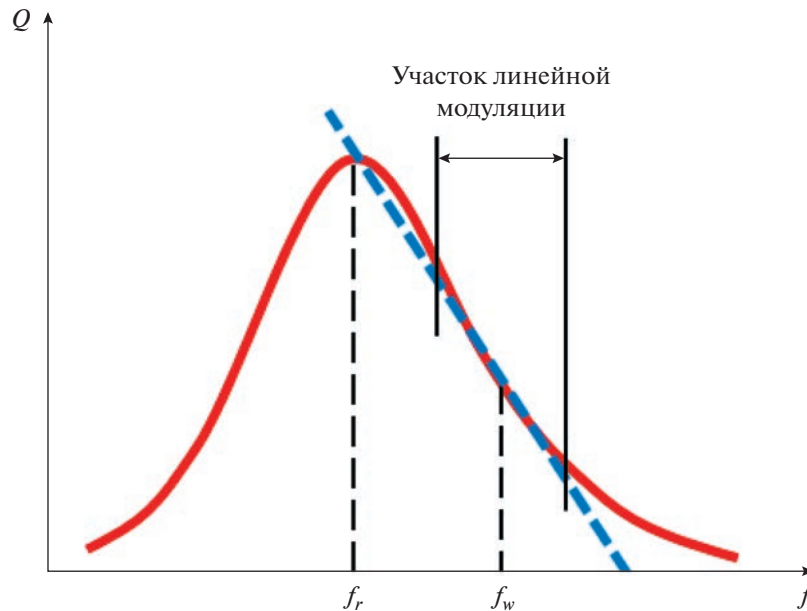


Рис. 5. Резонансная кривая выходного трансформатора ВЧ генератора.

нально выходному сигналу модуля (рис. 5). Эта линейность сохраняется вплоть до момента, когда отклонение частоты становится сопоставимым с расстоянием от рабочей точки f_w до максимума резонансной кривой f_r . Таким образом, интенсивность разряда изменялась сообразно сигналу, выходящему из ЦАП. В данной работе на актуатор подавалось синусоидальное напряжение с амплитудой 5–10 кВ и рабочей точкой $f_w = 185$ кГц при резонансной частоте $f_r = 160$ кГц.

Настройка параметров системы производилась вручную. Сначала были выбраны параметры КИХ-фильтра. Коэффициенты фильтра выбирались в виде $b_k = 2/N \cos(2\pi ki/N + \phi)$, $i = 8$, $N = 128$, что соответствовало центральной частоте $f_1 = 630$ Гц (число Струхала $St_1 = 0.23$). Выбор такой частоты обоснован в следующем разделе.

Затем соответствующая прошивка загружалась в модуль LCARD. Для реализации управления необходимо было отфильтрованный сигнал скорректировать по амплитуде и фазе (параметры ϵ и δ в формуле (8)). Соответствующие величины определялись эмпирически. Параметр ϵ варьировался за счет коэффициента модуляции β — коэффициента передачи между отфильтрованным сигналом и напряжением, приложенным к актуатору. Фазовый параметр δ регулировался введением временной задержки τ — эти параметры практически эквивалентны для узкополосных сигналов. Первое приближение для β выбиралось в режиме экспоненциального осреднения, при котором в реальном времени можно наблюдать за спектром сигналов. После нахождения β , при ко-

тором на спектре появлялся видимый эффект (усиления или ослабления), проводились серии измерений с пошаговым изменением параметров τ и β для нахождения режима, при котором эффект управления наиболее заметен. Параметр задержки τ изменялся в пределах $\Delta\tau \approx 1/f_c$ — характерного периода колебаний для узкополосного сигнала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Сначала рассмотрим результаты измерений ближнего и дальнего поля струи в компоновке без управления. На рис. 6а приведены спектры пульсаций ближнего поля для всех микрофонов. Спектры пульсаций характеризуются повышенным уровнем в области низких частот, соответствующих числам Струхала $St < 1$. При смещении микрофонов вниз по потоку низкочастотный максимум в спектре становится более выраженным, и спектр приобретает известную структуру с характерным изломом в поведении спектра при переходе от средних частот, на которых спадание спектра близко к $St^{-20/3}$, к высоким, где уровень пульсаций спадает как St^{-2} (рис. 6а). Данная структура спектра пульсаций ближнего поля подробно изучена в работе [37]. Низкочастотная часть спектра пульсаций определяется гидродинамическими волнами неустойчивости, а высокочастотная — акустическими возмущениями. Именно рассеяние низкочастотных гидродинамических возмущений на задней кромке пластины объясняет увеличение шума струи при ее нахождении вблизи крыла [4, 5, 10, 11].

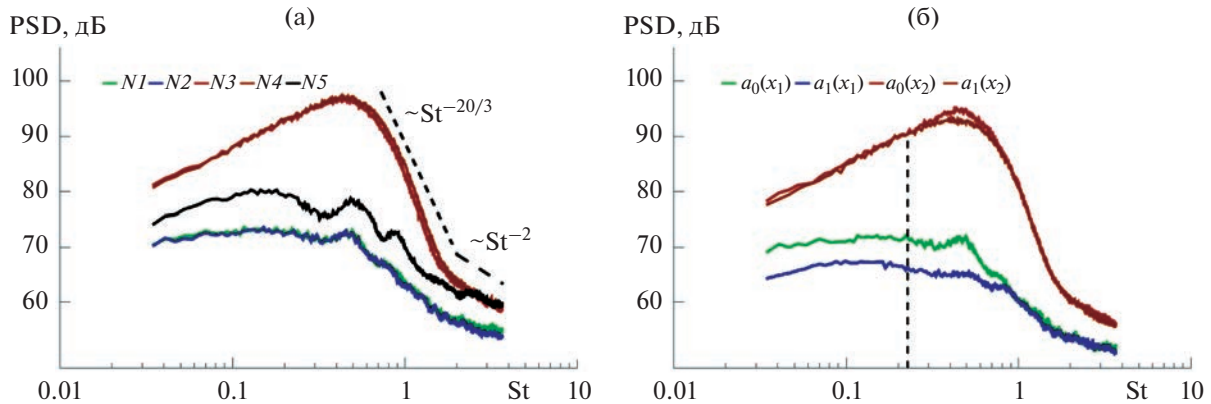


Рис. 6. Спектры ближнего поля установленной струи: (а) — полный сигнал; (б) — модальный состав. Управление включено.

В дополнение к спектрам суммарных сигналов для пар микрофонов $N1-N2$ (сечение x_1) и $N3-N4$ (сечение x_2) было проведено разложение на симметричные и антисимметричные компоненты в соответствии с формулами

$$\begin{aligned} a_0(x, t) &= (s_1(x, t) + s_2(x, t))/2, \\ a_1(x, t) &= (s_1(x, t) - s_2(x, t))/2, \end{aligned} \quad (10)$$

где s_1 и s_2 — сигналы, измеренные в симметричных противоположных точках ближнего поля струи в некотором поперечном сечении. Для пары $N1-N2$ обозначим симметричные и антисимметричные компоненты как $a_0(x_1)$ и $a_1(x_1)$, а для пары $N3-N4$ — как $a_0(x_2)$ и $a_1(x_2)$ соответственно. Поскольку, как показано в работе [11], в ближнем поле струи на низких частотах доминируют первые две азимутальные гармоники, можно считать, что выражение (10) дает приближенную оценку величин осесимметричной и первой косинус-мод в разложении акустического поля на азимутальные фурье-компоненты.

Спектры симметричной и антисимметричной компонент пульсаций показаны на рис. 6б. Для удобства последующего анализа целевая частота для управления показана вертикальной пунктирной линией. Как видно, в первом поперечном сечении (микрофоны $N1, N2$) доминируют осесимметричные возмущения, в то время как во втором сечении (микрофоны $N3, N4$) интенсивности симметричной и антисимметричной мод оказываются близкими.

Структура пульсаций ближнего поля, в которой доминируют осесимметричные возмущения, позволяет ожидать, что управление ими, реализуемое кольцевым актуатором, будет иметь заметный эффект как в ближнем, так и в дальнем поле. Спектры шума системы “сопло–пластина” в дальнем поле показаны на рис. 7. Для удобства на всех графиках приведены спектры шума свободной

струи (без пластины). Для микрофонов, расположенных в боковом направлении ($F3$) и направлении вверх по потоку ($F1, F2$), хорошо заметен низкочастотный ($St < 0.8$) шум взаимодействия струи и пластины, превышающий шум свободной струи на величину ~ 10 дБ. Отметим, что этот шум симметричен относительно пластины (рис. 7а), что согласуется с теоретическими моделями [5, 10, 11]. Данный шум имеет направленность с выраженным минимумом вниз по потоку вдоль плоскости пластины, поэтому для микрофонов $F4, F5$ его вклад в общий шум все менее заметен.

Далее рассмотрим ситуацию с включенной системой управления. Отметим, что разброс экспериментальных данных, связанных с повторяемостью измерений, составлял около 0.4 дБ, что меньше тех эффектов, которые обсуждаются ниже. На рис. 8а показан модуль функции когерентности γ между сигналом с микрофона $N5$, установленного на пластине, и микрофонами дальнего поля. Видно, что для микрофонов $F1, F3$ величина когерентности весьма велика и достигает 0.7, что говорит о доминирующем вкладе пульсаций ближнего поля, регистрируемых микрофоном $N5$, в шум взаимодействия струи и пластины. Именно поэтому микрофон $N5$ был выбран в качестве микрофона обратной связи для тестирования системы управления. Максимальная когерентность наблюдается в области $0.1 < St < 0.3$, поэтому частота для управления была выбрана из данной области ($St_l = 0.23$).

После настройки амплитудно-фазовых характеристик системы управления, процедура которой описана в разделе 2, были записаны сигналы при включенной системе управления. На рис. 8б показан модуль функции когерентности γ между сигналом с микрофона $N5$, установленного на пластине, и микрофонами дальнего поля при включенной системе. Видно, что на частоте управления когерентность существенно падает

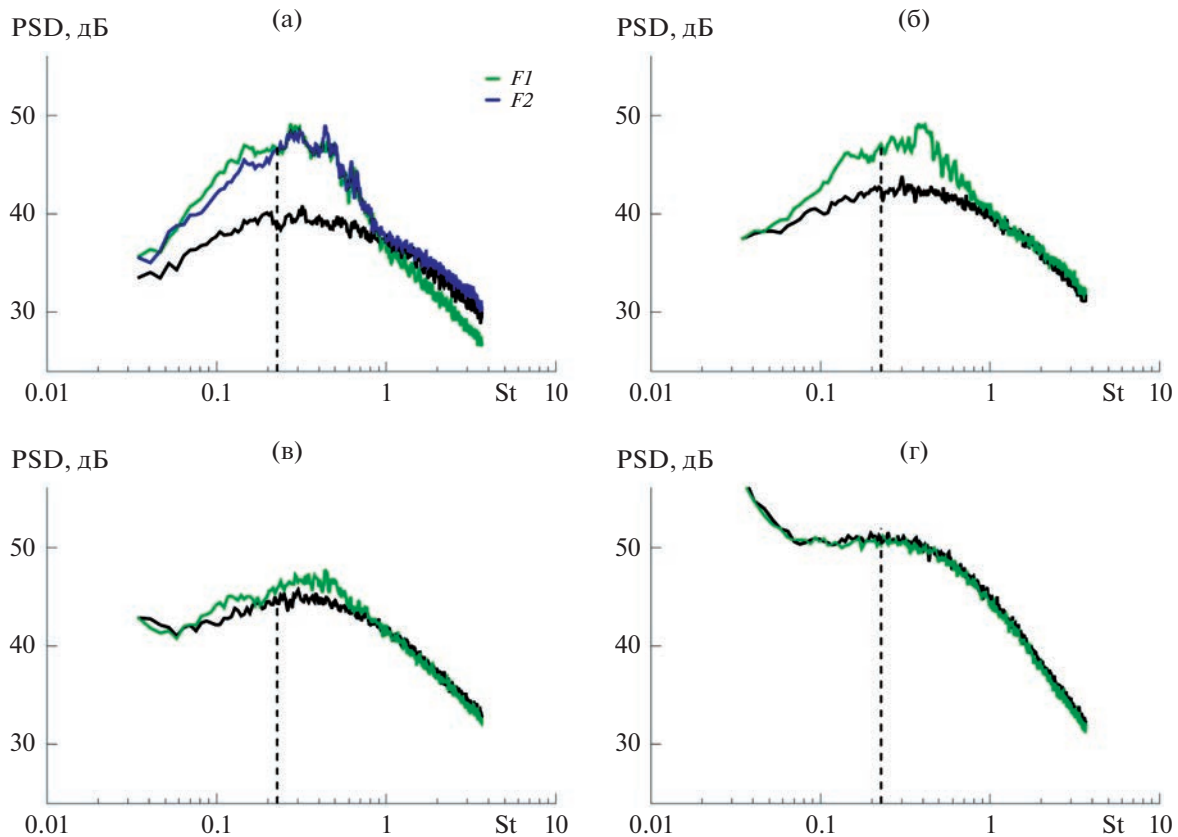


Рис. 7. Спектры дальнего поля установленной (цветные кривые) и изолированной (черные кривые) струи в различных точках наблюдения: (а) – микрофоны $F1$, $F2$; (б) – $F3$; (в) – $F4$; (г) – $F5$. Управление выключено.

(до уровней ~ 0.2), что говорит об эффективном подавлении той части пульсаций ближнего поля, которая отвечает за шум взаимодействия. Эффект управления не заметен лишь на микрофоне $F5$, для которого вклад шума взаимодействия в измеряемый сигнал, а значит, и значение когерентности с сигналом $N5$, очень малы. Для наглядности влияние управления на когерентность показано на рис. 9 в виде графиков величины $\partial\gamma = (|\gamma_{\text{вкл}}|/|\gamma_{\text{выкл}}| - 1) \times 100\%$ – относительного изменения модуля когерентности при активации системы управления.

Рассмотрим далее влияние управления непосредственно на спектры сигналов. На рис. 10 приведены спектры пульсаций в ближнем поле струи при включенной системе управления. Видно, что при включении системы управления изменяется именно осесимметричная часть ближнего поля в области расположения опорного датчика x_1 (рис. 10а). При этом в сечении x_2 , которое расположено на уровне задней кромки пластины, влияние управления не наблюдается. Это может быть связано с тем, что в данном сечении велик вклад рассеянного на кромке поля, а значит, состав азимутальных мод более богат, и па-

ры микрофонов уже недостаточно для корректного выделения осесимметричной части возмущений. На рис. 11 эффект управления показан в виде разностных спектров $\partial\text{PSD} = \text{PSD}_{\text{вкл}} - \text{PSD}_{\text{выкл}}$, где $\text{PSD}_{\text{выкл}}$ – спектр сигнала с выключенной системой управления, $\text{PSD}_{\text{вкл}}$ – с включенной системой. На опорном датчике эффект подавления пульсаций на центральной частоте фильтра достигает 3 дБ.

Рассмотрим результаты, полученные для дальнего поля. Соответствующие спектры для управляемой струи показаны на рис. 12 вместе с базовыми спектрами шума свободной струи (черные кривые) и шума системы “сопло–пластина” без управления (серые кривые). Сравнивая красные и серые кривые, можно отметить, что с использованием плазменного актуатора в системе с обратной связью в режиме подавления на управляющей частоте можно добиться заметного снижения в области вверх по потоку в боковом направлении (микрофоны $F1$ – $F3$), при этом поле на остальных частотах остается неизменным. Для области вниз по потоку (микрофоны $F4$ – $F5$, рис. 12г) изменение в спектре на частоте управления практически незаметно. Это объясняется тем, что вклад шума

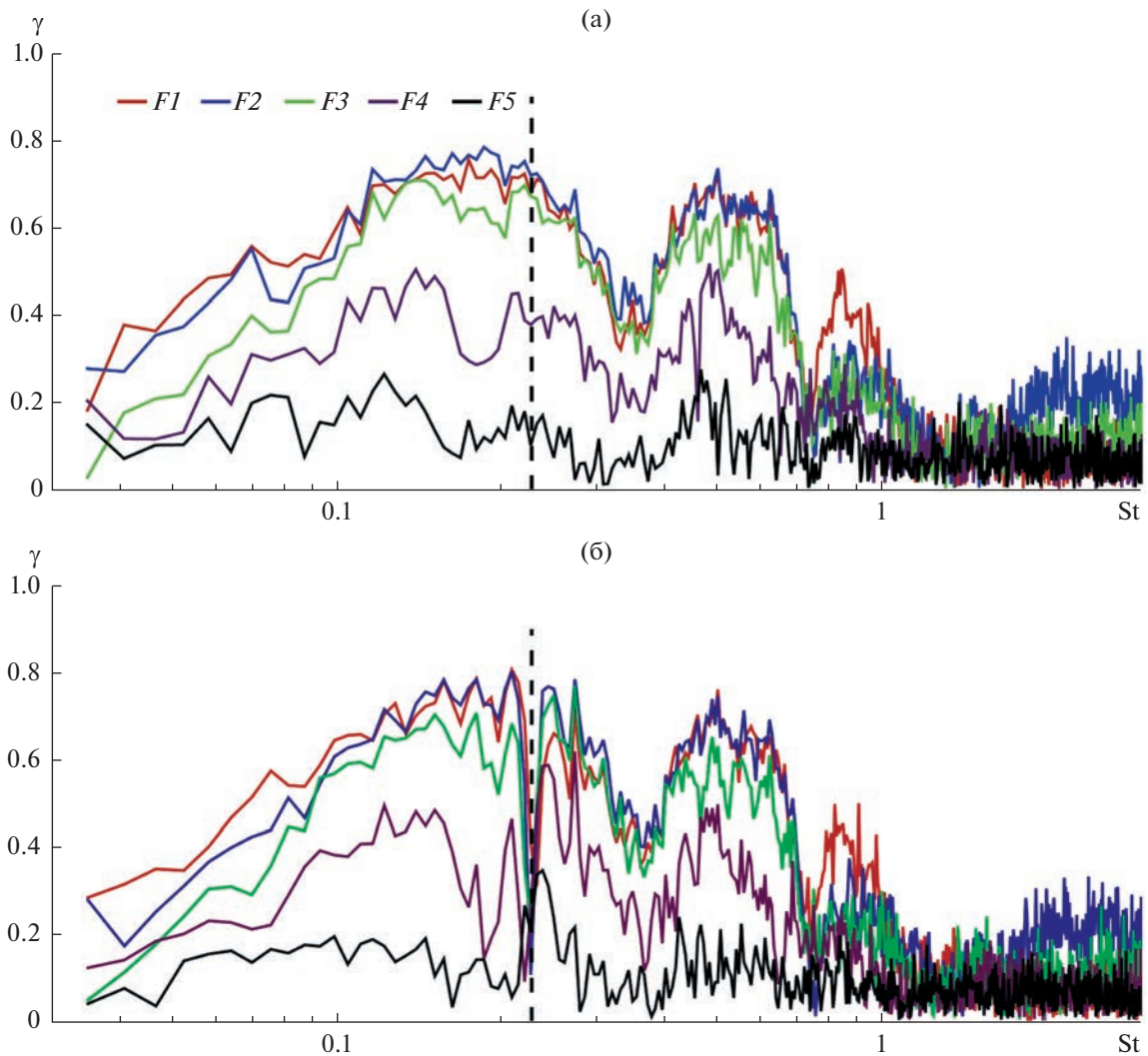


Рис. 8. Проверка статистической связи сигнала управляющего микрофона $N5$ с сигналами в дальней зоне $F1$ – $F5$: (а) – без управления ($|\gamma_{\text{выкл}}|$); (б) – с управлением в режиме подавления возмущений ($|\gamma_{\text{вкл}}|$). Вертикальной линией отмечено значение St_l .

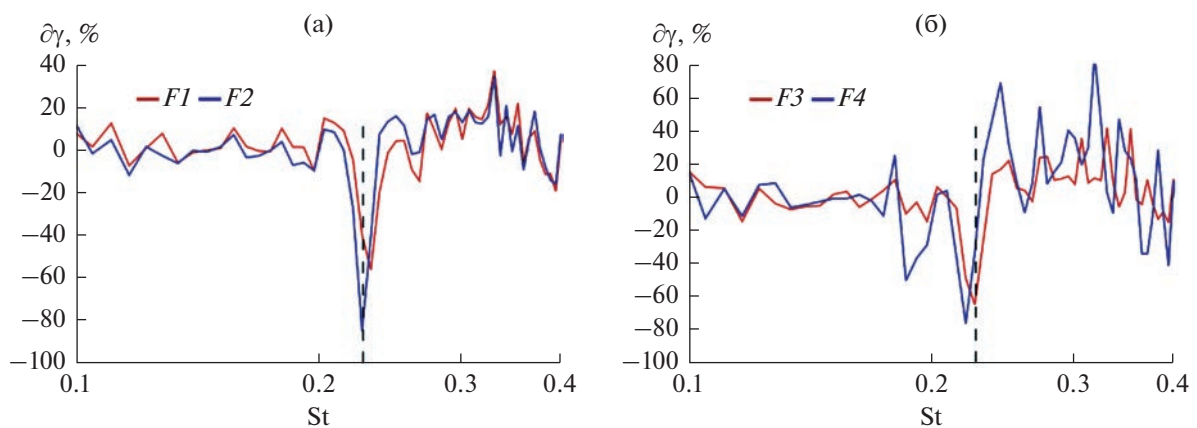


Рис. 9. Изменение когерентности между сигналом $N5$ и сигналами дальнего поля при включении управления: (а) – сигналами $F1, F2$; (б) – $F3, F4$. Вертикальной линией отмечено значение St_l .

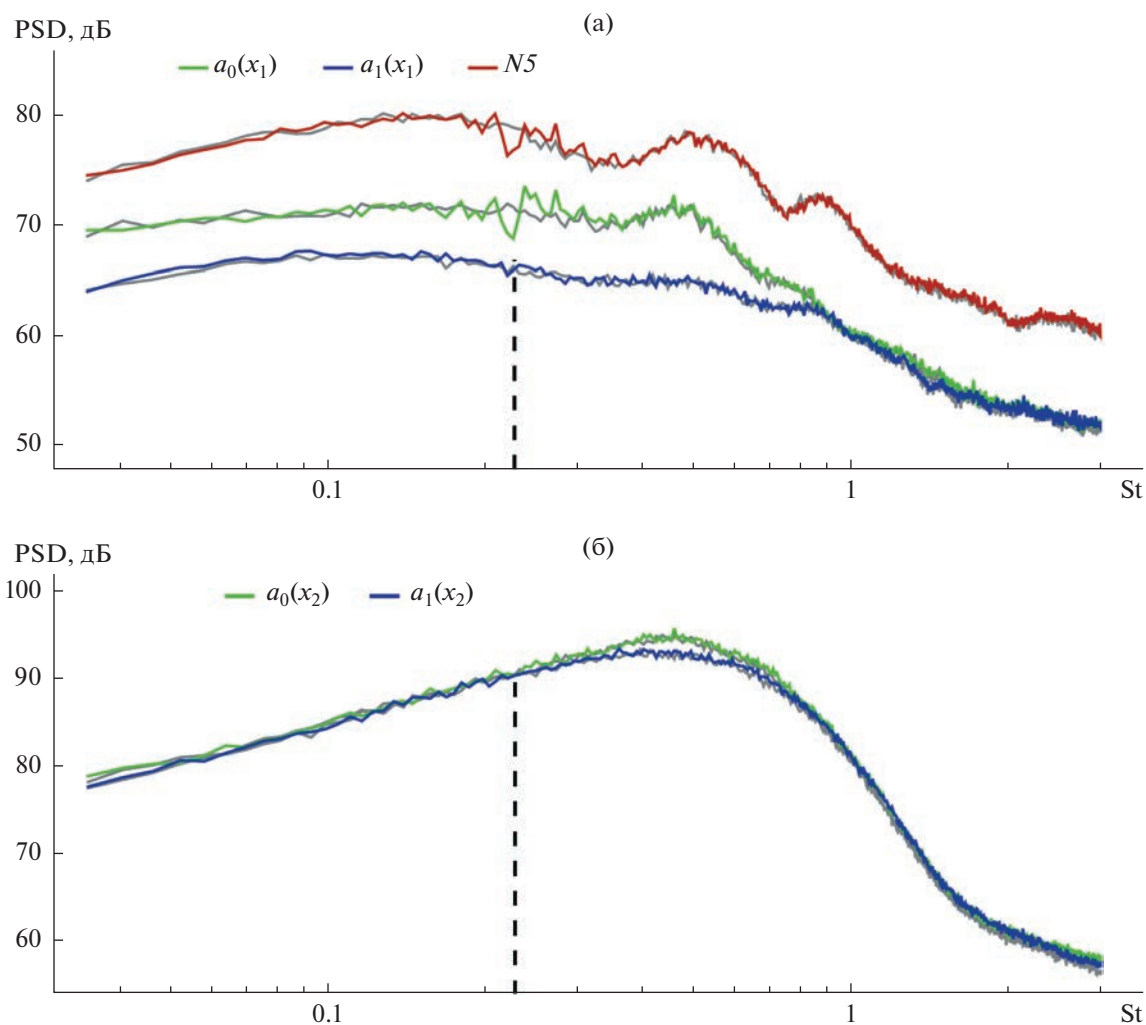


Рис. 10. Спектры пульсаций в ближнем поле струи при включенной системе управления ($PSD_{\text{вкл}}$): (а) – сечение x_1 ; (б) – сечение x_2 . Серым цветом представлены соответствующие спектры при выключенном управлении ($PSD_{\text{выкл}}$). Вертикальной линией отмечено значение St_1 .

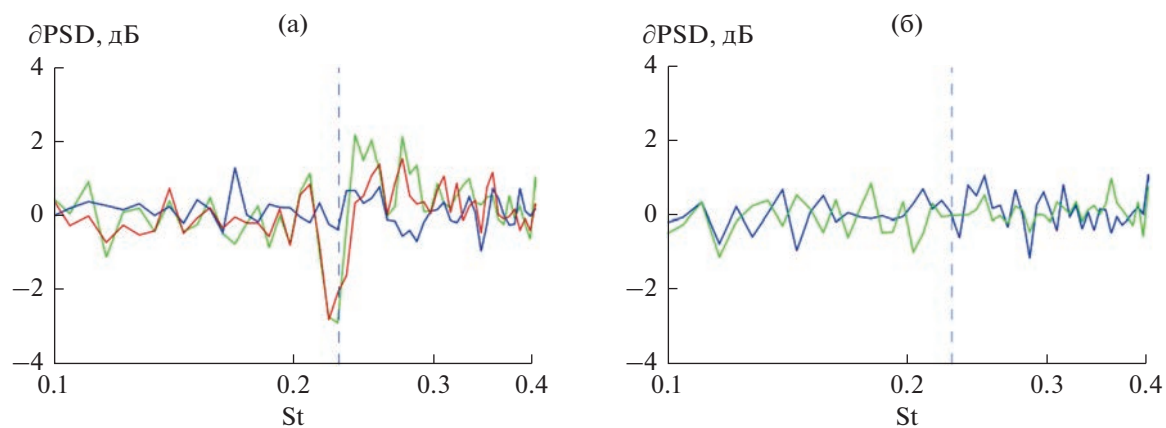


Рис. 11. Изменение спектров ближнего поля струи при включении системы управления $\delta PSD = PSD_{\text{вкл}} - PSD_{\text{выкл}}$: (а) – сечение x_1 ; (б) – сечение x_2 . Обозначение кривых представлено на рис. 10.

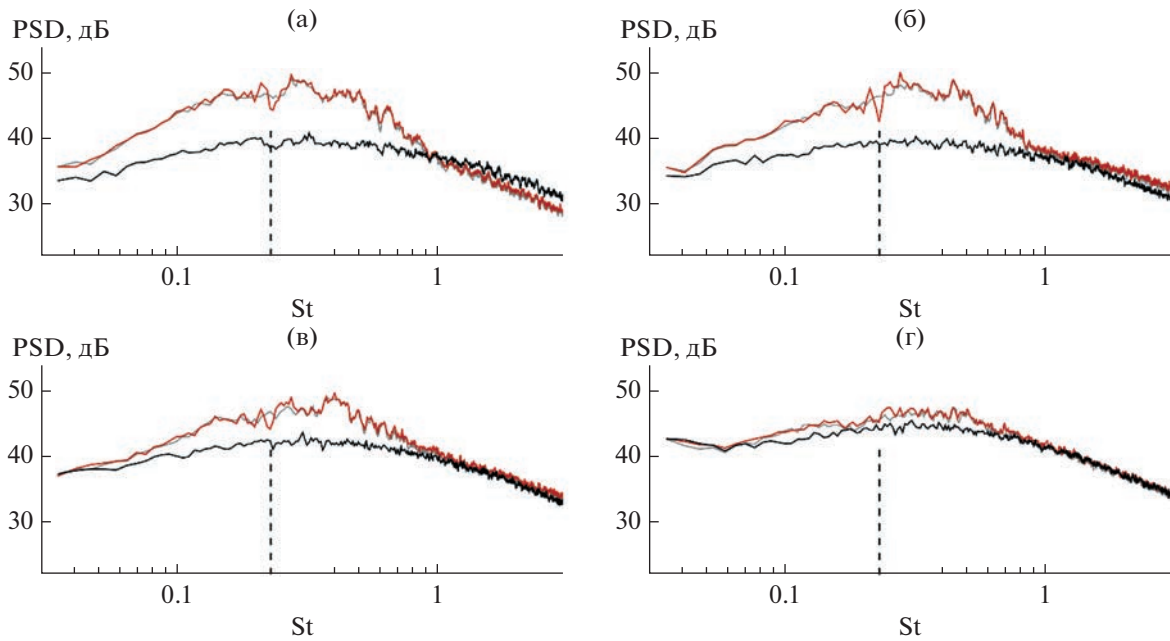


Рис. 12. Спектры шума в дальнем при включенном управлении (красные линии, $PSD_{\text{вкл}}$): (а) – микрофон $F1$; (б) – $F2$; (в) – $F3$; (г) – $F4$. Серым цветом представлены соответствующие спектры при выключенном управлении ($PSD_{\text{выкл}}$), черным цветом – спектры свободной струи.

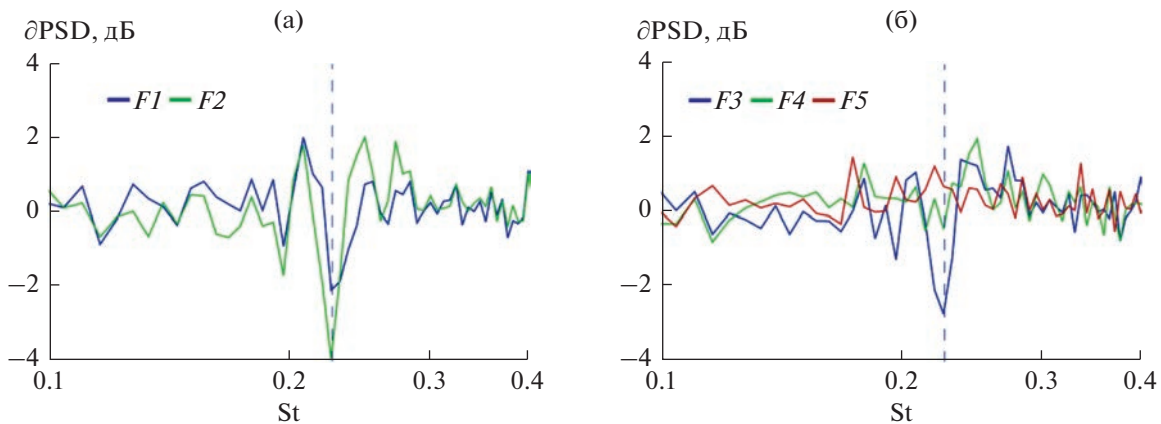


Рис. 13. Изменение спектров шума в дальнем при включении системы управления $\Delta PSD = PSD_{\text{вкл}} - PSD_{\text{выкл}}$: (а) – микрофоны $F1, F2$; (б) – $F3-F5$.

взаимодействия (ввиду особенности его направленности [11]) в суммарное поле для данной области углов наблюдения мал.

На рис. 13 более наглядно представлено изменение уровня шума дальнего поля при включении системы управления. Видно, что вверх по потоку и в боковом направлении снижение на центральной частоте фильтра достигает величины 2–4 дБ. При этом можно отметить, что зоны подавления возмущений в ближнем поле (рис. 11а) и шума в дальнем поле (рис. 13а) сопровождаются зонами

усиления сигнала в соответствии с моделью, описанной в разделе 1.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализована концепция активного подавления шума взаимодействия струи и пластины в узкой полосе частот с помощью плазменного актуатора ВЧ ДБР в составе системы управления с обратной связью. Алгоритм управления аналогичен тому, что использовался в работе [22]: он реализован с использованием модуля LCARD

E14-440D и основан на фильтрации опорного сигнала в узкой полосе частот в режиме реального времени и подаче этого сигнала в систему управления актуатором с введением амплитудной и фазовой коррекций. Представленная в данной работе система ориентирована на управление осесимметричными возмущениями ближнего поля в области задней кромки пластины, интенсивность которых линейно связана с интенсивностью шума взаимодействия.

Показано, что правильные настройки системы управления позволяют ослабить сигнал на опорном микрофоне примерно на 3 дБ в узкой полосе частот, определенной цифровым фильтром, реализованным в модуле управления. На частотах, несколько ниже и выше центральной частоты фильтра, наблюдаются боковые лепестки усиления сигнала, что связано с фазовыми характеристиками цифрового фильтра. Показано, что управляющее воздействие влияет только на осесимметричную моду возмущений ближнего поля.

Ослабление осесимметричной моды в ближнем поле струи на заданной частоте приводит к соответствующему снижению шума взаимодействия струи и пластины. Эффективность шумоподавления на целевой частоте составляет около 2–4 дБ на микрофонах, расположенных в направлениях выше по потоку, где шум взаимодействия доминирует, и уменьшается при движении наблюдателя вниз по течению по мере уменьшения вклада в суммарный сигнал шума взаимодействия вследствие его специфической направленности.

Результаты настоящей работы демонстрируют реальную возможность снижения шума взаимодействия струи и крыла в узкой полосе частот. Для усиления эффекта снижения шума, как по амплитуде, так и ширине полосы подавления, необходима более тщательная настройка системы управления, включающая в себя экспериментальное измерение входящих в уравнение обратной связи передаточных функций с целью определения требуемых амплитудно- и фазово-частотных характеристик фильтра, а также проектирование цифрового фильтра, реализующего данные характеристики.

Экспериментальные результаты получены с использованием УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ “ЦАГИ”, модернизируемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-1036.

Работа сотрудников ФАУ “ЦАГИ” в части проведения измерений ближнего и дальнего поля и разработки концепции управления выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 21-71-30016).

Разработка и реализация плазменного актуатора с системой питания и управления была выполнена сотрудниками ФГБУ ОИВТ РАН в рамках государственного задания РФ № 075-01056-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mengle V.G.* The Effect of Nozzle-to-Wing Gulley Height on Jet Flow Attachment to the Wing and Jet-Flap Interaction Noise // AIAA Paper 2011-2705, 2011.
2. *Mead C.J., Strange P.J.R.* Under-wing installation effects on jet noise at sideline // AIAA Paper 98-2207, 1998.
3. *Mengle V.G., Brusniak L., Elkoby R.* Reducing Propulsion Airframe Aeroacoustic Interactions with Uniquely Tailored Chevrons: 3. Jet-Flap interaction // AIAA Paper 2006-2435, 2006.
4. *Kopiev V.F., Faranosov G.A., Zaytsev M.Yu., Vlasov E.V., Karavosov R.K., Belyaev I.V., Ostrikov N.N.* Intensification and suppression of jet noise sources in the vicinity of lifting surfaces // AIAA Paper 2013-2284, 2013.
5. *Cavalieri A.V.G., Jordan P., Wolf W.R., Gervais Y.* Scattering of wavepackets by a flat plate in the vicinity of a turbulent jet // J. Sound Vib. 2014. V. 333. P. 6516–6531.
6. *Kopiev V., Belyaev I., Faranosov G., Kopiev V.I., Ostrikov N., Zaytsev M., Paragin G.* Numerical and Experimental Study of JFI Effect on Swept Wing // AIAA Paper 2014-3060, 2014.
7. *Lawrence J.* Aeroacoustic Interactions of Installed Subsonic Round Jets // PhD thesis, Univ. of Southampton, 2014.
8. *Vera J., Self R.H., Kingan M.J.* The prediction of the radiated pressure spectrum produced by jet-wing interaction // AIAA Paper 2015-2216, 2015.
9. *Беляев И.В., Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А.* Исследование влияния угла отклонения закрылка на шум взаимодействия двухконтурной струи и стреловидного крыла в спутном потоке // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 1. С. 17–29.
10. *Lyu B., Dowling A.P., Naqavi I.* Prediction of installed jet noise // J. Fluid Mech. 2017. V. 811. P. 234–268.
11. *Бычков О.П., Фараносов Г.А.* Экспериментальное исследование и теоретическое моделирование шума взаимодействия струи и крыла самолета // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 4. С. 437–453.
12. *Piantanida S., Jaunet V., Huber J., Wolf W., Jordan P., Cavalieri A.V.G.* Scattering of turbulent-jet wavepackets by a swept trailing edge // AIAA Paper 2015-2998, 2015.
13. *Mankbadi R.R.* Dynamics and Control Coherent Structures in Turbulent Jets // Applied Mechanics Reviews. 1992. V. 45. № 6. P. 219–248.
14. *Kopiev V.F.* On the possibility and prospects of turbulent flow noise control // CD-ROM Proceedings FM11-12156 XXI ICTAM. 15–21 August 2004. Warsaw. Poland.
15. *Samimy M., Kim J.H., Adamovich I., Utikin Y., Kastner J.* Toward Noise Mitigation in High Speed and High Reynolds Number Jets Using Plasma Actuators // AIAA Paper 2006-2703, 2006.

16. Копьев В.Ф., Битюрин В.А., Беляев И.В., Годин С.М., Зайцев М.Ю., Климов А.И., Копьев В.А., Моралев И.А., Остриков Н.Н. Управление шумом струи с помощью плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 473–482.
17. Samimy M., Kearney-Fischer M., Kim J.H. High-speed and high-Reynolds-number jet control using localized arc filament plasma actuators // Journal of Propulsion and Power. 2012. V. 28. № 2. P. 269–280.
18. Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Копьев В.А., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А. Акустическое управление волнами неустойчивости в турбулентной струе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 19–30.
19. Kopiev V.F., Akishev Y.S., Belyaev I.V., Berezhetskaya N.K., Bityurin V.A., Faranosov G.A., Grushin M.E., Klimov A.I., Kopiev V.A., Kossyi I.A., Moralev I.A., Ostrikov N.N., Taktakishvili M.I., Trushkin N.I., Zaytsev M.Yu. Instability wave control in turbulent jet by plasma actuators // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 1–18.
20. Crawley M., Sinha A., Samimy M. Near-field and acoustic far-field response of a high-speed jet to excitation // AIAA Journal. 2015. V. 53. № 7. P. 1894–1909.
21. Sinha A., Towne A., Colonius T., Schlinker R.H., Reba R., Simonich J.C., Shannon D.W. Active control of noise from hot supersonic jets // AIAA J. 2017. V. 56. № 3. P. 933–948.
22. Копьев В.Ф., Бычков О.П., Копьев В.А., Фараносов Г.А., Моралев И.А., Казанский П.Н. Управление волнами неустойчивости в невозбужденной турбулентной струе с помощью плазменных актуаторов в узкой полосе частот // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 4. С. 431–439.
23. Беляев И.В., Бычков О.П., Зайцев М.Ю., Копьев В.А., Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А., Чернышев С.А. Разработка стратегии активного управления волнами неустойчивости в невозбужденных турбулентных струях // Изв. РАН МЖГ. 2018. № 3. С. 14–27.
24. Suzuki T., Colonius T. Instability waves in a subsonic round jet detected using a near-field phased microphone array // J. Fluid Mech. 2006. V. 565. P. 197–226.
25. Jordan P., Colonius T. Wave Packets and Turbulent Jet Noise // Annual Review of Fluid Mechanics. 2013. V. 45. P. 173–195.
26. Kopiev V., Faranosov G., Bychkov O., Kopiev V.I., Moralev I., Kazansky P. Active control of jet-plate interaction noise for excited jets by plasma actuators // J. Sound Vib. 2020. V. 484. P. 115515.
27. Копьев В.Ф., Фараносов Г.А. Управление волной неустойчивости в двумерной задаче о кромке сопла // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 3. С. 371–379.
28. Фараносов Г.А. Теоретическое исследование эффективности внешнего возбуждения волн неустойчивости в двумерной модели кромки сопла // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 549–555.
29. Milling R. Tollmien–Schlichting wave cancellation // Phys. Fluids. 1981. V. 24. № 5. P. 979–981.
30. Бычков О.П., Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А., Чернышев С.А. О двух подходах к моделированию шума низкоскоростных дозвуковых струй // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 1. (в печати).
31. Moralev I., Sherbakova V., Selivonin I., Bityurin V., Ustinov M. Effect of the discharge constriction in DBD plasma actuator on the laminar boundary layer // Int. J. Heat Mass Transf. 2018. V. 116. P. 1326–1340.
32. Kazansky P.N., Klimov A.I., Moralev I.A. High-frequency actuator control of air flow near a circular cylinder: Impact of the discharge parameters on the cylinder aerodynamic drag // High Temp. 2012. V. 50. № 3. P. 323–330.
33. Thomas F.O., Kozlov A., Corke T.C. Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction // AIAA J. 2008. V. 46. № 8 P. 1921–1931.
34. Kopiev V.F., Kazansky P.N., Kopiev V.A., Moralev I.A., Zaytsev M.Yu. HF DBD plasma actuators for reduction of cylinder noise in flow // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. V. 50. 475204.
35. Faranosov G., Bychkov O.P., Kopiev V., Kopiev V.A., Moralev I., Kazansky P. Plasma-based active closed-loop control of instability waves in unexcited turbulent jet. Part 2. Installed jet // AIAA Paper 2019–2558, 2019.
36. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980.
37. Arndt R.E.A., Long D.F., Glauser M.N. The proper orthogonal decomposition of pressure fluctuations surrounding a turbulent jet // J. Fluid Mech. 1997. V. 340. P. 1–33.