

УДК 532.59,534.23,534.6

## УПРАВЛЕНИЕ ВОЛНАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В НЕВОЗБУЖДЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ В УЗКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

© 2021 г. В. Ф. Копьев<sup>a, \*</sup>, О. П. Бычков<sup>a</sup>, В. А. Копьев<sup>a</sup>, Г. А. Фараносов<sup>a, b</sup>,  
И. А. Моралев<sup>c</sup>, П. Н. Казанский<sup>c</sup>

<sup>a</sup>ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, ул. Радио 17, Москва, 105005 Россия

<sup>b</sup>МФТИ, Институтский пер. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

<sup>c</sup>ФГБУ ОИВТ РАН, ул. Ижорская 13 стр. 2, Москва, 125412 Россия

\*e-mail: vkopiev@mksagi.ru

Поступила в редакцию 16.03.2021 г.

После доработки 16.03.2021 г.

Принята к публикации 23.04.2021 г.

Волны неустойчивости, развивающиеся в слое смещения турбулентной струи, во многих случаях являются источниками шумообразования (высокоскоростные струи, струи вблизи крыла самолета и др.). В работе экспериментально исследована возможность активного управления волнами неустойчивости в невозбужденной дозвуковой турбулентной струе. Система управления с обратной связью состоит из микрофонов ближнего поля, с которых снимается опорный сигнал, плазменного актуатора на основе высокочастотного диэлектрического барьерного разряда, а также модуля обработки данных. Показано, что в зависимости от настроек системы возмущения давления в ближнем поле турбулентной струи, связанные с осесимметричными волнами неустойчивости, могут ослабляться или усиливаться в заданной узкой полосе частот.

*Ключевые слова:* турбулентная струя, волны неустойчивости, активное управление, управление шумом

DOI: 10.31857/S0320791921040055

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий снижения шума турбулентной струи, которые не требуют изменения геометрии сопла и не влияют на рабочие характеристики двигателя в крейсерских условиях, является актуальной научной проблемой, которая, несмотря на большие усилия, еще не решена. Одной из основных причин этого является недостаток знаний о механизмах генерации шума в турбулентных струях. Подходы к снижению шума струй можно разделить на пассивные и активные. При этом для пассивных методов и активных методов без обратной связи знание о механизмах генерации шума не является критическим, и можно эмпирически исследовать эффекты влияния модификации геометрии сопел (например, шевроны, лепестки и т.д.) [1–4] или изучать влияние на струю различных устройств-актуаторов (плазменных, микроструйных или подвижных механических) [5–11], создающих “управляющие” возмущения без обратной связи, и получать в целом положительные результаты. Подобный подход предполагает перебор множества вариантов, большая часть которых обычно приводит к усиле-

нию, а не к снижению шума, а получаемый в некоторых случаях положительный эффект часто сосредоточен в ограниченной области спектра и сопровождается неконтролируемым усилением шума вне ее пределов. Потенциально перспективными являются так называемые активные методы управления с обратной связью, основанные на непрерывном отслеживании с помощью системы сенсоров текущего состояния потока и создании с помощью системы актуаторов “направленного” управляющего воздействия с целью ослабления нежелательных возмущений в потоке [12]. Одновременно с этим, методы такого типа являются наиболее сложными для практической реализации, поскольку они требуют достаточно глубокого понимания динамических свойств системы (собственные моды системы, свойства актуаторов, реакция системы на воздействие и т.д.), по крайней мере, для тех возмущений, на которые оказывается воздействие. Это обстоятельство является основным препятствием на пути создания реально работающих систем для управления характеристиками развитых турбулентных течений.

Применительно к турбулентным струям наиболее подходящими физическими объектами для

активного управления с обратной связью являются крупномасштабные структуры – волны неустойчивости, развивающиеся в слое смещения струи за счет неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. В работах [13–17] были развиты подходы к аналитическому описанию эволюции волн неустойчивости в слое смещения, адекватность которых была подтверждена в экспериментах [16–19]. Таким образом, волны неустойчивости, как динамические объекты, достаточно хорошо изучены, и поэтому могут являться “целевыми” возмущениями для активной системы управления.

Как известно [14, 20], эффективность излучения шума волнами неустойчивости возрастает с увеличением скорости струи, так что для высокоскоростных струй, скорость истечения которых существенно превышает скорость звука в окружающей среде, шум смещения в значительной мере определяется именно ими [15, 16, 18]. Относительно роли волн неустойчивости в генерации шума свободными низкоскоростными струями единая точка зрения на настоящий момент отсутствует. Для таких струй существует большое разнообразие моделей источников шума, многие из которых не связаны с волнами неустойчивости [21–26]. Однако для так называемых “струй в компоновке”, истекающих из сопла, расположенного вблизи крыла самолета, волны неустойчивости оказываются источником существенного дополнительного шума, возникающего за счет их рассеяния на задней кромке крыла, даже для низкоскоростных струй [27, 28]. Таким образом, задача управления волнами неустойчивости является актуальной как для дозвуковых, так и для сверхзвуковых струй.

В работе [29] была предложена концепция активного управления, согласно которой для подавления волн неустойчивости, неизбежно присутствующих в слое смещения струи, вблизи кромки сопла располагается актуатор, создающий “управляющие” волны неустойчивости, которые в заданной узкой полосе частот имели бы ту же амплитуду, что и естественные волны неустойчивости (ЕВ), но находились бы в противофазе с ними. В таком случае в линейном приближении эти волны гасили бы друг друга, что, в свою очередь, приводило бы к снижению связанного с ними шума (свободной струи или струи в компоновке). Идея о создании управляющих волн на кромке сопла связана с тем, что именно окрестность кромки наиболее восприимчива к внешним возмущениям [30, 31]. В работе [32] данная концепция была обоснована теоретически в рамках двумерной модели, а затем проверена в экспериментах с искусственными волнами неустойчивости (ИВ), возбуждаемыми динамиком на фиксированной частоте, которые затем подавлялись управляющими волнами, создаваемыми независимыми источниками: динамиком [33]

или плазменными актуаторами различных типов [34]. Предполагалось, что при тональном возбуждении ИВ представляют собой усиленные на заданной частоте ЕВ, что облегчало их идентификацию в эксперименте и упрощало алгоритм управления, поскольку амплитуда и фаза ИВ были детерминированными величинами. Для ЕВ, рассматриваемых в узкой полосе частот, ситуация во многих отношениях аналогична ситуации с ИВ, что позволило в работе [19] разработать концепцию и алгоритм управления ЕВ и оценить принципиальную возможность их практической реализации на примере анализа характеристик реальных сигналов, измеренных в ближнем поле струи.

Насколько известно авторам, демонстрация возможности активного управления волнами неустойчивости в невозбужденных струях, характеризующихся широкополосным спектром, в реальном эксперименте ранее не проводилась. Настоящая работа посвящена реализации в эксперименте концепции управления ЕВ, изложенной в [19]. В системе управления используется плазменный актуатор на основе высокочастотного диэлектрического барьерного разряда (ВЧ ДБР). Отметим, что актуаторы подобного типа хорошо зарекомендовали себя в задачах управления течениями. Ранее они использовались для возбуждения сдвигового слоя струи [34], снижения шума струи и шума обтекания цилиндра в системе без обратной связи [8, 36, 37], управления ламинарно-турбулентным переходом в пограничном слое [38], а также управления отрывом при обтекании тела [39, 40]. Система обратной связи, реализованная в настоящем исследовании, в качестве входных данных использует сигналы с микрофонов, расположенных вблизи границы струи, и на основе линейного алгоритма генерирует управляющий сигнал на актуаторе. В работе представлены результаты измерений ближнего поля в отсутствие управления, а также для режимов подавления и усиления естественных возмущений в струе в узкой полосе частот.

## 1. СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Стратегия управления, реализованная в настоящем исследовании, была сформулирована в работе [19]. Основная идея базируется на предположении о том, что волны неустойчивости, генерируемые естественными возмущениями в потоке, и структуры, возбуждаемые внешним управляющим воздействием, взаимодействуют между собой линейным образом. Следовательно, если система управления на данной частоте отрегулирована так, что управляющие возмущения равны по амплитуде и находятся в противофазе к ЕВ, то последние могут быть подавлены. Данный подход проиллюстрирован на рис. 1.

В подобной системе управления актуатор расположен на внутренней поверхности сопла вблизи его среза, а опорный датчик, используемый для подстройки управляющего воздействия, расположен ниже по потоку (рис. 1). Таким образом, реализуется так называемое управление с обратной связью. В работе [35] было предложено использовать систему управления с прямой связью, в которой воздействие актуатором на течение происходит ниже по потоку от опорного датчика. Хотя управление с прямой связью может потенциально быть более эффективным, особенности использования плазменных актуаторов, которые технически сложно разместить на удалении от сопла, накладывают ограничения на использование такого подхода. Кроме того, следует отметить, что расположение актуатора на поверхности сопла вблизи его кромки позволяет возбуждать довольно сильные волновые пакеты при небольшой амплитуде воздействия. Это связано с тем, что в окрестности кромки сопла велика как восприимчивость сдвигового слоя к возбуждению [30, 31], так и инкремент неустойчивости, определяемый мнимой частью корня дисперсионного соотношения [17]. Таким образом, для создания сравнимых по амплитуде управляющих воздействий актуатор, расположенный непосредственно на кромке сопла, будет существенно более эффективен, чем актуатор, расположенный ниже по потоку. Относительно низкая мощность, необходимая для работы актуатора при его расположении на кромке сопла, может быть важна с точки зрения минимизации собственного шума актуатора, который является серьезным паразитным эффектом при использовании газовых разрядов для генерации управляющих возмущений [7–9]. В предыдущих исследованиях [34, 41] было показано, что актуатор на базе ВЧ ДБР может эффективно возбуждать сдвиговый слой при сравнительно низком собственном шуме. Такой тип актуатора успешно использовался в системах управления для подавления ИВ [32, 41]. Основными механизмами воздействия разряда на поток в этом случае являются электрогидродинамическая сила (ионный ветер) и периодический нагрев газа. В настоящей работе используется актуатор, аналогичный использованному в [41].

Алгоритм, реализованный в системе управления, в целом соответствует алгоритму, описанному в работе [19]. Он основан на фильтрации сигнала, получаемого опорными датчиками, в узкой полосе частот в режиме реального времени и подаче этого сигнала в систему управления актуатором с введением амплитудной и фазовой коррекций. Система, реализованная в настоящей работе, ориентирована на управление осесимметричными возмущениями. С одной стороны, осесимметричное воздействие может быть легко реализовано кольцевым актуатором, установленным внутри

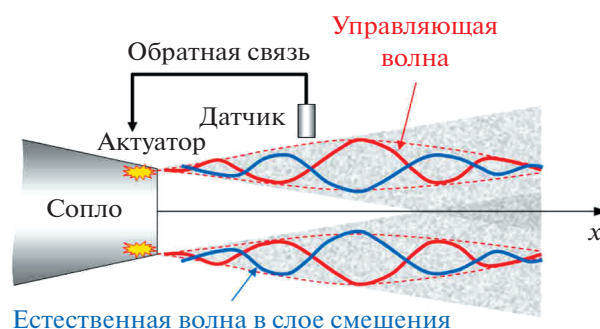


Рис. 1. Общая концепция управления волнами неустойчивости в слое смешения струи.

сопла, а с другой — именно осесимметричные волны неустойчивости вносят определяющий вклад в шум свободной высокоскоростной струи [16, 20] и в шум струи, расположенной вблизи крыла [27, 28].

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для генерации волн неустойчивости использовался актуатор высокочастотного диэлектрического барьерного разряда (ВЧ ДБР), установленный на внутренней поверхности сопла. Конструкция актуатора и его интеграция в сопло были аналогичны используемым в работе [41]. В данной серии экспериментальных исследований были использованы металлические сопла диаметром 40 мм, покрытые алундовой керамикой толщиной 1 мм (рис. 2). Разряд создавался по краям металлического кольцевого электрода, наклеенного на внутреннюю поверхность сопла, а само сопло при этом служило вторым электродом (рис. 2б). Данная конфигурация позволяла устанавливать электрод достаточно близко к кромке сопла с тем, чтобы повысить эффективность генерации волн неустойчивости. Расстояние от кромки электрода до плоскости среза сопла находилось в пределах  $l = 3\text{--}5$  мм (рис. 2б). Предварительные параметрические исследования показали резкое снижение восприимчивости сдвигового слоя к возмущениям актуатора с увеличением этого расстояния. Высокое напряжение создавалось источником питания на основе транзисторных ключей с резонансным трансформатором в выходном каскаде. На актуатор подавалось синусоидальное напряжение с амплитудой 5–10 кВ и частотой  $\sim 130$  кГц. Типичная длина разряда составляла 3–6 мм. Мощность разряда оценивалась по площади вольт-амперных циклограмм [42] и составляла  $\sim 700$  Вт/м по длине электрода.

Эксперименты проводились в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Число Маха истечения струи составляло  $M = 0.53$ , число Рейнольдса по диаметру сопла и скорости истечения —  $Re = 4.9 \times 10^5$ . В экс-

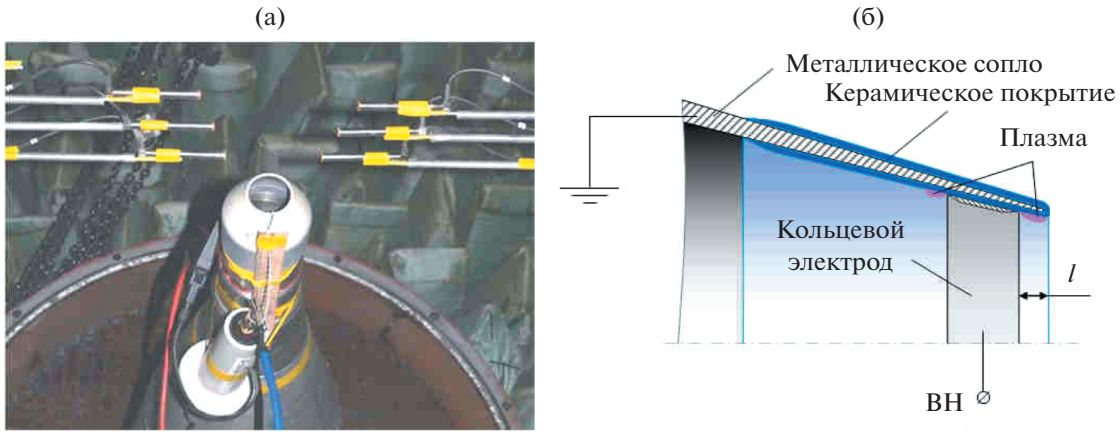


Рис. 2. Сопло с актуатором: (а) – фото; (б) – схема сопла в разрезе.

периментах измерялись пульсации давления в ближнем поле струи. Для измерений использовались шесть 1/4" микрофонов Briel&Kjaer (тип 4935), расположение которых показано на рис. 3. Микрофоны (обозначенные на рис. 3 как N1, ..., N6) были расположены в линейной области ближнего поля вблизи внешней границы слоя смешения струи, что позволяло регистрировать волны неустойчивости [17, 19]. Микрофоны были подключены к системе сбора и анализа данных PULSE 3560-С. Для вспомогательного контроля сигнала в дальнем поле использовались также 5 микрофонов, расположенных на дуге радиуса

$R = 2$  м под углами  $15^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$  к оси струи (на рис. 3 не показаны).

Для выделения осесимметричной составляющей возмущений микрофоны были сгруппированы в три пары, расположенные симметрично относительно оси струи, как показано на рис. 3. Как было показано, например, в работе [19], в ближнем поле струи на низких и умеренных частотах доминируют только две первые азимутальные моды. Следовательно, двух микрофонов в каждом поперечном сечении струи достаточно для оценки уровней осесимметричной и первой азимутальной мод. Если  $s_1$  и  $s_2$  – сигналы, измеренные в симметричных противоположных точках в ближнем поле струи в некотором поперечном сечении  $x$ , то формулы

$$\begin{aligned} a_0(x, t) &= (s_1(x, t) + s_2(x, t))/2, \\ a_1(x, t) &= (s_1(x, t) - s_2(x, t))/2, \end{aligned} \quad (1)$$

дают сигналы, соответствующие осесимметричной  $a_0$  и первой  $a_1$  моде. Для пары N1–N2 симметричные и антисимметричные компоненты пульсаций обозначим  $a_0(x_1, t)$  и  $a_1(x_1, t)$ , для пары N3–N4 –  $a_0(x_2, t)$  и  $a_1(x_2, t)$ , а для пары N5–N6 –  $a_0(x_3, t)$  и  $a_1(x_3, t)$ , соответственно.

Обработка сигнала реализована на базе модуля LCARD E14-440D (рис. 3), объединяющего аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и цифровой сигнальный процессор (ЦСП) ADSP-2185M с тактовой частотой 48 МГц, микроконтроллер для управления модулем и передачи данных через порт USB. Возможности модуля позволяют подключать до 16 микрофонов с частотой дискретизации 25 кГц.

Поскольку разряд инициировался на кольцевом осесимметричном электроде, предполагалось, что актуатор генерирует в основном осесим-

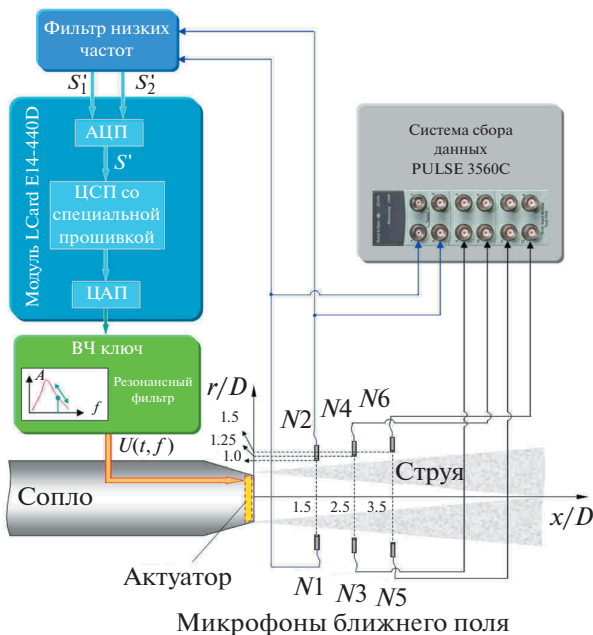
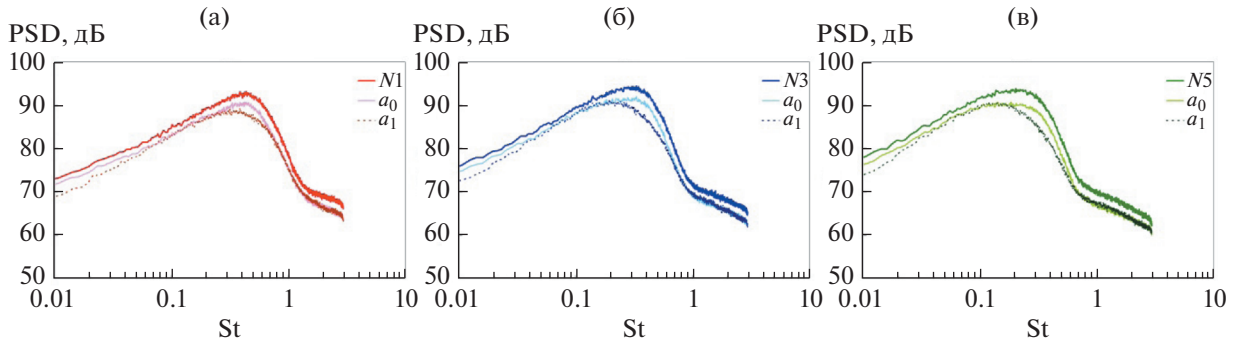


Рис. 3. Схема расположения микрофонов и схема системы управления.



**Рис. 4.** Спектры ближнего поля полного сигнала (микрофоны  $N1$ ,  $N3$ ,  $N5$ ) и его симметричной ( $a_0$ ) и антисимметричной ( $a_1$ ) составляющих для трех поперечных сечений струи: (а) –  $x/D = 1.5$ ; (б) –  $x/D = 2.5$ ; (в) –  $x/D = 3.5$ . Система управления отключена.

метричную волну неустойчивости. Поэтому в качестве опорного сигнала для системы управления использовался сигнал  $a_0(x_1)$  с пары микрофонов  $N1-N2$ . Таким образом, сначала вычислялась полусумма сигналов с микрофонов  $N1-N2$ , а затем она обрабатывалась при помощи ЦСП. Алгоритм обработки включал в себя фильтрацию сигнала с помощью фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра)

$$Y_n = \sum_{k=0}^{N-1} b_k X_{n-k} \quad (2)$$

с коэффициентами

$$b_k = \frac{2}{N} K(k) \cos\left(\frac{2\pi k i}{N} + \varphi\right), \quad i = 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

где  $K$  – прямоугольное окно либо окно Кайзера [43].

Фаза и амплитуда каждой гармоники могли задаваться отдельно. В данной работе использовалась одиночная гармоника (узкополосная фильтрация), и фазовый сдвиг выбирался исходя из требования общего сдвига фазы на  $\pi$  в центре полосы пропускания, чтобы обеспечить приход искусственных возмущений в точку измерения в противофазе с ЕВ.

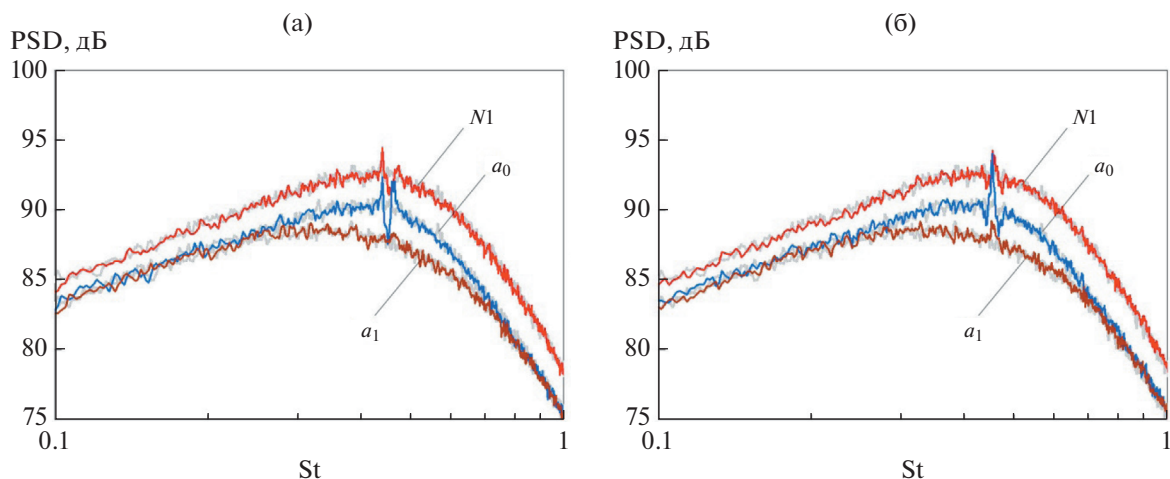
Сигналы с двух микрофонов  $N1-N2$  снимались с частотой дискретизации 100 кГц, при этом фильтр использовал каждый 10-й отсчет АЦП. Выходной сигнал генерировался с помощью ЦАП и использовался для модуляции частоты питающего напряжения. В результате модуляции частоты на правой ветви резонансной кривой выходного трансформатора ВЧ генератора напряжение  $U$  питания разряда модулировалось пропорционально выходному сигналу модуля. Эта линейность сохраняется вплоть до момента, когда отклонение частоты становится сопоставимым с расстоянием от рабочей точки до максимума резонансной кривой. Принципиальная схема системы приведена на рис. 3.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Спектры ближнего поля струи с выключенной системой управления, измеренные микрофонами  $N1$ ,  $N3$ ,  $N5$ , показаны на рис. 4. Они также имеют типичную форму с низкочастотным максимумом, соответствующим гидродинамическим пульсациям давления [28]. На этом же рисунке показаны спектры симметричной  $a_0$  и антисимметричной  $a_1$  азимутальных компонент пульсаций, рассчитанные по формуле (1). Видно, что при числах Струхалия  $0.3 < St < 0.6$  в общем сигнале доминирует осесимметричная мода. В связи с тем, что актуатор должен генерировать осесимметричные волны неустойчивости, для испытательной системы управления была выбрана частота из данного диапазона, что гарантировало достаточно точное выделение осесимметричной моды парой микрофонов.

Далее представлены результаты испытаний работы системы управления. Регулировка параметров системы для заданных условий работы струи и положения опорных микрофонов осуществлялась вручную. На первом этапе были выбраны параметры КИХ-фильтра (центральная частота  $f_c$ , соответствующая  $St = 0.46$ , количество выборок  $N$ , оконная функция), которые загружались в ЦСП. Для настоящей работы были выбраны  $f_c = 2.05$  кГц ( $St = 0.46$ ),  $N = 128$ ,  $K = 4$ .

Затем, чтобы получить желаемый эффект управления (ослабление или усиление сигнала в заданной полосе частот вблизи  $f_c$ ), необходимо было настроить коэффициент модуляции  $\beta$  и время задержки по времени  $\tau$ . Коэффициент  $\beta$  характеризует соотношение величины отфильтрованного сигнала  $a_0(x_1, t)$  и напряжения, приложенного к актуатору, и должен быть выбран так, чтобы амплитуда управляющего возмущения в месте расположения опорных датчиков была бы равна амплитуде естественных возмущений в этом же месте. Время задержки  $\tau$  для узкополос-



**Рис. 5.** Спектры полного сигнала (микрофон  $N1$ ) и его симметричные ( $a_0$ ) и антисимметричные ( $a_1$ ) компоненты для поперечного сечения  $x/D = 1.5$ : (а) – режим подавления возмущений; (б) – режим усиления. Серые кривые соответствуют спектрам струи без управления.

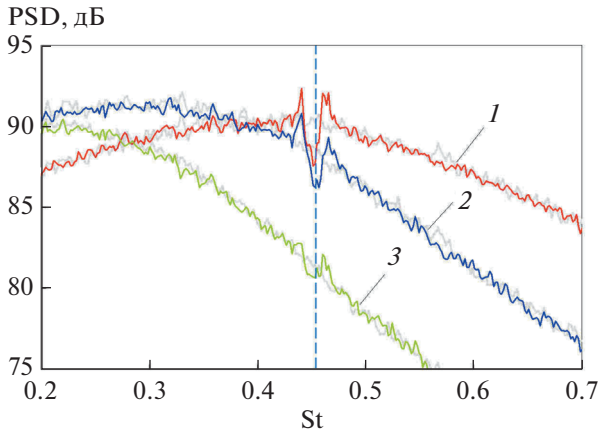
ных сигналов эквивалентно задержке по фазе и должно быть выбрано так, чтобы управляющие и естественные возмущения в месте расположения датчиков оказались в противофазе (для ослабления сигнала) или в фазе (для усиления). Параметры  $\beta$  и  $\tau$  определяются геометрией системы и средними параметрами потока и содержат в себе информацию о передаточной функции между напряжением, подаваемым на актуатор, и теми гидродинамическими возмущениями, которые актуатор инициирует в месте расположения опорных датчиков. Поиск оптимальной пары  $\beta$  и  $\tau$ , соответствующей максимальному ослаблению сигнала вокруг центральной частоты КИХ-фильтра, осуществлялся итерационно вручную. Когда такая пара была найдена, было выполнено несколько измерений с разными временными задержками (в течение одного типичного периода  $\Delta t \approx 1/f_c$  узкополосного сигнала), чтобы исследовать не только эффект подавления ЭВ, но и эффект их усиления.

На рис. 5 показаны спектры полного сигнала и спектры азимутальных мод для опорного сечения  $x/D = 1.5$  для двух режимов работы системы: режима подавления и режима усиления возмущений. Серые кривые на рис. 5 соответствуют спектрам свободной струи с выключенной системой управления и показаны для удобства оценки эффекта управления. Хорошо видно, что управляющее воздействие, как и ожидалось, локализовано именно в осесимметричной моде. Этот результат подтверждает исходное допущение о том, что актуатор генерирует преимущественно осесимметричные волны неустойчивости, а также то, что простое двухмикрофонное разложение полного сигнала (1) позволяет корректно выделить осесимметричную моду. Поэтому ниже анализируются

только осесимметричные возмущения ближнего поля. Видно, что в режиме подавления величина снижения возмущений осесимметричной моды на целевой частоте достигает 2.6 дБ, а в режиме усиления – интенсивность возмущений увеличивается на величину около 4 дБ. Это подтверждает работоспособность реализованной системы управления.

Для более детального анализа на рис. 6 приведены спектры симметричных мод во всех трех исследованных сечениях для режима подавления возмущений. Серые кривые соответствуют контрольным спектрам свободной струи. Видно, что эффект управления уменьшается при удалении от опорного сечения: в опорном сечении  $x/D = 1.5$  максимальная величина снижения составляет 2.8 дБ, в сечении  $x/D = 2.5$  – 2.4 дБ, в сечении  $x/D = 3.5$  – 0.8 дБ. Это можно объяснить тем, что при увеличении расстояния от опорного сечения величина когерентности между пульсациями в текущем и опорном сечениях уменьшается [28], что косвенно указывает на тот факт, что ЭВ в струе генерируются не только возмущениями на кромке сопла, но и возмущениями в объеме слоя смешения. Таким образом, масштаб когерентности ЭВ ограничивает область вблизи опорного сечения, в которой может быть достигнуто снижение пульсаций. Этот эффект необходимо учитывать, например, при создании системы снижения шума компоновки “струя–крыло” [41].

Нужно также отметить, что помимо ослабления возмущений вблизи центральной частоты наблюдается некоторое усиление сигнала вблизи краев полосы пропускания фильтра (рис. 5, 6), или, наоборот, для режима усиления можно видеть ослабление сигнала. Таким образом, имеет место своего рода “обратный эффект” управле-



**Рис. 6.** Спектры осесимметричной моды в трех сечениях струи: 1 –  $x/D = 1.5$ ; 2 –  $x/D = 2.5$ ; 3 –  $x/D = 3.5$ . Режим подавления. Серые кривые соответствуют спектрам струи без управления. Вертикальная линия обозначает положение центральной частоты фильтра  $f_c$ .

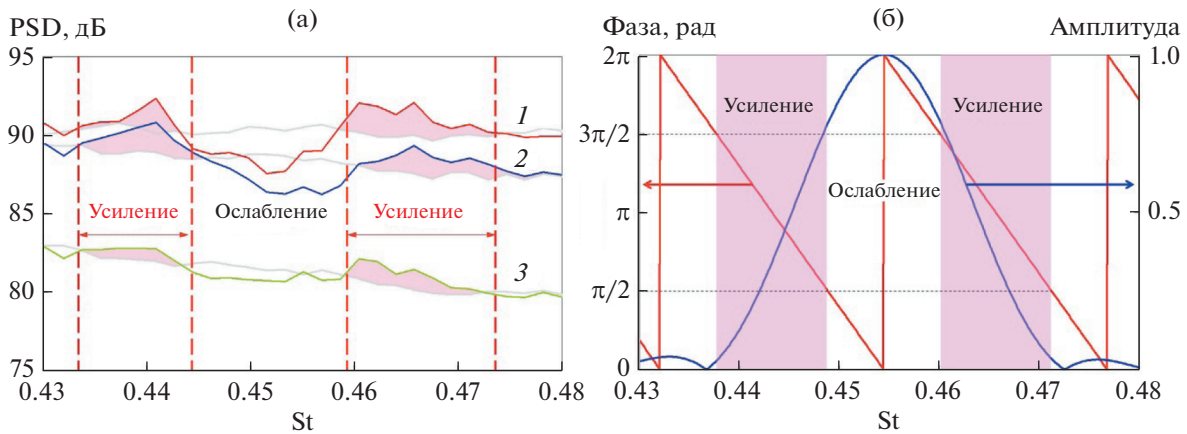
ния. Данный эффект более детально изображен на рис. 7а для системы, работающей в режиме подавления возмущений на заданной частоте. Как уже отмечалось, для эффективного ослабления ЭВ управляющая волна неустойчивости, созданная актуатором, должна иметь такую же амплитуду, что и ЭВ, и находиться в противофазе с ними. Тем не менее, для любого числового фильтра второе условие может быть выполнено только в некоторой полосе, определяемой наклоном фазовой характеристики системы в целом (рис. 7б). Вдали от этой полосы частот неизбежно будет иметь место некоторое усиление естественных возмущений. Действительно, фазово-частотная характеристика используемого фильтра является линейной, и сдвиг фазы  $\Delta$  уве-

личивается с увеличением сдвига  $|f - f_c|$  от центральной частоты. Следовательно, сигнал будет ослаблен для  $|\Delta| < \pm\pi/2 + 2\pi n$  и усилен для  $\pi/2 + 2\pi n < |\Delta| < 3\pi/2 + 2\pi n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Для режима усиления, наоборот, сигнал будет усиливаться для частот, соответствующих  $|\Delta| < \pm\pi/2 + 2\pi n$ , и ослабляться – для  $\pi/2 + 2\pi n < |\Delta| < 3\pi/2 + 2\pi n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Соответствующие зоны показаны на рис. 7б, и видно, что наблюдаемый в эксперименте обратный эффект проявляется в диапазонах частот, близких к расчетным значениям. Поскольку амплитудная характеристика фильтра спадает достаточно быстро при удалении от центральной частоты, величина обратного эффекта для плоского спектра ЭВ будет меньше прямого эффекта на центральной частоте (рис. 7а).

В заключение отметим, что для исследованной низкоскоростной струи на микрофонах в дальнем поле эффекта управления заметно не было. Для микрофонов в боковом направлении, где шум струи достаточно слаб, на частоте управления проявлялся собственный шум актуатора, а для микрофонов, близких к оси струи, спектр шума не изменялся при включении системы управления. Для наблюдения эффекта управления шумом струи в дальнем поле с помощью разработанной системы необходимо рассматривать более высокоскоростные струи, для которых волны неустойчивости являются значимыми источниками шума.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность реализации в эксперименте предложенной ранее в [19] концепции активного управления волнами



**Рис. 7.** Обратный эффект управления. (а) – Спектры осесимметричной моды в трех сечениях струи в режиме подавления ( $1 - x/D = 1.5$ ;  $2 - x/D = 2.5$ ;  $3 - x/D = 3.5$ ). Заливкой выделены зоны усиления сигнала, серые кривые соответствуют спектрам струи без управления. (б) – Амплитудная и фазовая частотные характеристики КИХ-фильтра, заливкой выделены зоны усиления сигнала.

неустойчивости в невозбужденной дозвуковой струе в узкой полосе частот. Для возбуждения управляющего воздействия использовался плазменный актуатор на основе ВЧ ДБР. Алгоритм управления был реализован с использованием стандартного модуля LСARD E14-440D, объединяющего АЦП, ЦАП и ЦСП. Скользящая фильтрация сигнала была реализована с помощью цифрового КИХ-фильтра. Результаты, представленные в работе, были получены для узкополосного фильтра шириной ~100 Гц с центральной частотой, соответствующей числу Струхала 0.46. Для обратной связи использовалась полусумма сигналов, измеряемых двумя симметрично расположенными относительно оси струи микрофонами. Это позволило обеспечить управление осесимметричными волнами неустойчивости.

Показано, что предлагаемая система управления способна ослаблять в опорном сечении пульсации давления, соответствующие осесимметричной моде, на целевой частоте на величину до 2.8 дБ. Также было продемонстрировано, что эффект управления уменьшается при смещении вниз по потоку от опорного сечения и составляет около 0.8 дБ для микрофонов, расположенных на расстоянии двух калибров от опорных.

В измерениях наблюдалось явление, заключающееся в инвертировании эффекта управления по обе стороны от центральной частоты, на которую настроена система управления. Показано, что данный “обратный” эффект обусловлен особенностями системы обратной связи и фазовой характеристикой КИХ-фильтра. Для получения положительного интегрального эффекта управления необходимо расширять полосу подавления так, чтобы она охватывала спектральный максимум с “вытеснением” обратного эффекта на боковые склоны спектра. Решению данной задачи будут посвящены будущие исследования.

Для исследованной низкоскоростной струи не было замечено снижения шума в дальнем поле при ослаблении пульсаций, связанных с волнами неустойчивости. Для получения прямого эффекта управления шумом струи с помощью предложенной системы необходимо рассматривать более высокоскоростные струи, для которых волны неустойчивости являются значимыми источниками шума. Кроме того, данная система управления должна приводить к снижению шума взаимодействия струи и крыла при условии ее настройки таким образом, чтобы ослаблялись пульсации в области расположения задней кромки крыла.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Москвы, проект 19-31-70005 (реализация концепции управления в эксперименте), а также Российского научного фон-

да, проект 19-71-10064 (методика идентификации волн неустойчивости в ближнем поле).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gliebe P.R., Brausch J.F., Majjigi R.K., Lee R.* Jet Noise Suppression. Aeroacoustics of flight vehicles. Theory and practice // Edited by *Hubbard H.* NASA Langley Research Center. 1991. V. 2. P. 207–270.
2. *Zaman K., Bridges J.E., Huff D.L.* Evolution from “tabs” to “chevron technology” – a review // *Int. J. Aeroacoustics.* 2011. V. 10. № 5–6. P. 685–709.
3. *Кузнецов В.М.* Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 1 С. 91–102.
4. *Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н.* Снижение шума дозвуковой струи за счет гофрированной формы сопла // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 2. С. 232–234.
5. *Samimy M., Kim J.H., Adamovich I., Utkin Y., Kastner J.* Toward noise mitigation in high speed and high Reynolds number jets using plasma actuators // *AIAA Paper.* 2006. 2006–2703.
6. *Kopiev V.F., Ostrikov N.N., Kopiev V.A., Belyaev I.V., Faranov G.A.* Instability wave control by plasma actuators: problems and prospects // *AIAA Paper.* 2011. 2011–973.
7. *Kearney-Fischer M., Kim J.H., Samimy M.* Noise control of a high Reynolds number high speed heated jet using plasma actuators // *Int. J. Aeroacoustics.* 2011. V. 10. № 5–6. P. 635–658.
8. *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.
9. *Samimy M., Kearney-Fischer M., Kim J.H.* High-speed and high-Reynolds-number jet control using localized arc filament plasma actuators // *J. of Propulsion and Power.* 2012. V. 28. № 2. P. 269–280.
10. *Koenig M., Sasaki K., Cavalieri A.V.G., Jordan P., Gervais Y.* Jet-noise control by fluidic injection from a rotating plug: linear and nonlinear sound-source // *J. Fluid Mech.* 2016. V. 788. P. 358–380.
11. *Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К.* Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 239 с.
12. *Brunton S.L., Noack B.R.* Closed-loop turbulence control: Progress and challenges // *Applied Mechanics Reviews.* 2015. V. 67 / 050801-1.
13. *Седельников Т.Х.* О частотном спектре шума сверхзвуковой струи. Физика аэродинамических шумов. М.: Наука, 1967. 83 с.
14. *Tam C.K.W., Morris P.J.* The radiation of sound by the instability waves of a compressible plane turbulent shear layer // *J. Fluid Mech.* 1980. V. 98(2). P. 349–381.
15. *Tam C.K.W., Burton D.E.* Sound generated by instability waves of supersonic flows: Part 2. Axisymmetric jets // *J. Fluid Mech.* 1984. V. 138. P. 273–295.



16. *Kopiev V.F., Chernyshev S.A., Zaitsev M.Yu., Kuznetsov V.M.* Experimental validation of instability wave theory for round supersonic jet // AIAA Paper. 2006. AIAA-2006-2595.
17. *Gudmundsson K.* Instability wave models of turbulent jets from round and serrated nozzles. PhD thesis. 2010. California Institute of Technology.
18. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Экспериментальное исследование роли волн неустойчивости в механизме излучения шума сверхзвуковой струей // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 4. С. 124–133.
19. *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.
20. *Jordan P., Colonius T.* Wave packets and turbulent jet noise // Annual Review of Fluid Mechanics. 2013. V. 45. P. 173–195.
21. *Tam C., Aurialt L.* Jet mixing noise from fine-scale turbulence // AIAA Journal. 1999. V. 37. № 2. P. 145–153.
22. *Ewert R.* RPM – the fast Random Particle-Mesh method to realize unsteady turbulent sound sources and velocity fields for CAA applications // AIAA Paper. 2007. 2007–3506.
23. *Kopiev V., Zaitsev M., Chernyshev S., Ostrikov N.* Vortex ring input in subsonic jet noise // Int. J. Aeroacoustics. 2007. V. 6. № 4. P. 375–405.
24. *Бендерский Л.А., Крашенинников С.Ю.* Исследование шумообразования в турбулентных струях на основе вычислительного моделирования нестационарного течения в слое смешения // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 4. С. 149–162.
25. *Karabasov S.A., Afsar M.Z., Hynes T.P., Dowling A.P., McMullan W.A., Pokora C.D., Page G.J., McGuirk J.J.* Jet noise: acoustic analogy informed by large eddy simulation // AIAA Journal. 2010. V. 48. № 7. P. 1312–1325.
26. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источник шума в струях // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 482–497.
27. *Lyu B., Dowling A.P., Naqavi I.* Prediction of installed jet noise // J. Fluid Mech. 2017. V. 811. P. 234–268.
28. *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.
29. *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.
30. *Фараносов Г.А.* Теоретическое исследование эффективности внешнего возбуждения волн неустойчивости в двумерной модели кромки сопла // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 549–555.
31. *Faranosov G.* Theoretical investigation of the effectiveness of artificial instability waves excitation in subsonic jets // AIAA Paper. 2012. 2012–2145.
32. *Копьев В.Ф., Фараносов Г.А.* Управление волной неустойчивости в двумерной задаче о кромке сопла // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 3. С. 371–379.
33. *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.
34. *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., Zaitsev M.Yu.* Instability wave control in turbulent jet by plasma actuators // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 1–18.
35. *Sasaki K., Piantanida S., Cavalieri A.V., Jordan P.* Real-time modelling of wavepackets in turbulent jets // J. Fluid Mech. 2017. V. 821. P. 458–481.
36. *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.
37. *Kopiev V.F., Kazansky P.N., Kopiev V.A., Moralev I.A., Zaitsev M.Yu.* HF DBD plasma actuators for reduction of cylinder noise in flow // J. Physics D: Applied Physics. 2017. V. 50 / 475204.
38. *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.
39. *Baranov S., Moralev I.A., Sboev D.S., Tolkachev S.N., Ustinov M.* On effects of “killer mode” excitation by dielectric barrier discharge in a swept wing boundary layer // XIX Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. August 13–19, 2018. Novosibirsk, Russia.
40. *Kazanskyi 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. 323–30.
41. *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.
42. *Manley T.C.* The electric characteristics of the ozonator discharge // J. Electrochem. Soc. 1943. V. 84. P. 83–96.
43. *Хемминг П.В.* Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980.