

УДК 532.529

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОГОЙ КАВЕРНЕ С ПОМОЩЬЮ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

© 2024 г. П. Н. Казанский

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: fokkoo@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.09.2023 г.

После доработки 27.11.2023 г.

Принята к публикации 04.12.2023 г.

Впервые исследованы различные режимы подавления тонального шума в мелкой каверне при использовании плазменного актуатора в цепи обратной связи. Исследования проведены при скорости потока 37 м/с и числе Рейнольдса 120 000. Продемонстрировано снижение амплитуды резонансных пульсаций давления на задней стенке каверны при 12 дБ. Показано, что работа разряда в составе системы с обратной связью позволяет уменьшить энергозатраты в разряд в 2.5 раза до 50 Вт/м. Визуализация поля скоростей методом PIV с фазовой синхронизацией позволила восстановить эволюцию когерентных структур в сдвиговом слое каверны. Период когерентных структур в сдвиговом слое соответствует спектру пульсаций давления в каверне.

DOI: 10.31857/S0040364424020029

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структуры течения в кавернах проводится с начала прошлого века. При распространности различных каверн в природе и технике [1] они являются неотъемлемым элементом современных летательных аппаратов. Развитие пульсаций давления и когерентных структур в сдвиговом слое технических каверн приводит к опасным кивкам выпускаемых изделий [2], повреждению установленного в каверне оборудования [3], росту шума обтекания [4, 5].

На дозвуковых и транзвуковых скоростях спектр пульсаций давления содержит как непрерывную, так и тональную компоненты [6]. Как правило, преобладание случайных компонентов присуще пологим кавернам (отношение длины каверны к ее глубине $L/D > 4$), а периодических компонентов — глубоким кавернам ($L/D < 4$). В мелких кавернах механизм формирования тональных пульсаций обусловлен возбуждением так называемых мод. Зарождение возмущений в сдвиговом слое происходит вблизи кромки верхней по потоку стенки. В сдвиговом слое наблюдается избирательное усиление возмущений, при этом формируются крупномасштабные структуры с длиной волны до 30 толщин пограничного слоя. Рассеяние вихрей на нижней стенке приводит к генерации акустических волн, которые распространяются внутри каверны. Акустические

волны возбуждают сдвиговый слой вблизи передней кромки, тем самым замыкая петлю естественной обратной связи. Дальнейшее развитие теории [7, 8] позволило учесть толщину пограничного слоя и ограничение по глубине полости при определении частоты резонансных колебаний. Попытка предсказать амплитуду доминирующей моды была осуществлена в [9].

Управление модами основано на модификации сдвигового слоя либо на возбуждении тех или иных возмущений в нем с помощью различных актуаторов. Среди пассивных методов обычно выделяют установку на переднюю кромку шевронов [10], ступеней, секционирование каверны на части [11], а так же скругление передней и задней кромок [12]. Активные методы управления без использования обратной связи обычно предполагают возбуждение в каверне искусственных когерентных структур. Низкочастотное возбуждение различных мод приводит к изменению среднего течения в сдвиговом слое. При достаточно большой амплитуде искусственных возмущений нарастание доминирующей моды происходит медленнее [13]. Это, как правило, ведет к подавлению одних мод и усилению других. Использование высокочастотного возбуждения приводит к увеличению эффективной турбулентной вязкости в сдвиговом слое вблизи передней кромки. В результате уменьшается инкремент

усиления волны в сдвиговом слое, который необходим для поддержания резонанса [14]. При этом появляется возможность подавления всех мод одновременно. Данный аспект особенно важен в случаях, когда резонансные частоты трудно предугадать, а использование систем с обратной связью дорого и сложно.

Использование систем обратной связи фундаментально отличается от режимов с разомкнутой связью [15]. В этом случае управление происходит на резонансной частоте соответствующей моды. В результате требуемая для управления мощность ниже. По мере увеличения энерговыклада происходит увеличение воздействия на возмущения в пограничном слое вблизи передней кромки каверны. В разомкнутых системах напротив наблюдается пороговое значение воздействия. Таким образом, для систем с обратной связью могут быть снижены требования к механической и диэлектрической прочности узлов, при этом повышается их робастность. К тому же отмечается, что управление как с разомкнутым, так и с замкнутым контуром обеспечивает сопоставимые результаты по уменьшению амплитуды резонансного тона [16] и не оказывает существенного влияния на среднее поле течения. Однако управление с обратной связью делает это, как правило, при меньших на порядок мощностях и имеет дополнительные возможности для модернизации управления при более сложных нестационарных режимах обтекания.

В работах [17, 18] продемонстрировано переключение между модами в кавернах при сверхзвуковых и дозвуковых скоростях с использованием искровых актуаторов для возбуждения сдвигового слоя. Однако данных об использовании плазменных актуаторов для подавления резонансных колебаний в режиме обратной связи найти не удалось. Численное моделирование работы плазменного актуатора на основе барьерного разряда (БР) демонстрирует изменение компоненты объемной силы вблизи электродов и распределение объемной плотности заряда [19]. Представленные значения достаточны для воздействия на возмущения в пограничном слое вблизи передней кромки каверны. Целью данной работы являются демонстрация возможности управления пульсациями давления с помощью БР-актуатора, а также сравнение режимов управления с обратной связью и без нее.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проведены в дозвуковой трубе Д-2 ОИВТ РАН. Труба выполнена по схеме разомкнутого контура с коэффициентом поджатия потока от форкамеры к ра-

бочей части 16:1. Рабочая часть имела сечение 0.1×0.1 м² и длину 0.8 м. Стенки трубы выполнены из оргстекла и обеспечивают оптический доступ. Внутри камеры располагались два тела вытеснения, между которыми формировалась прямоугольная полость (рис. 1). Глубина полости составляла 50 мм, а длина изменялась в диапазоне от 0 до 240 мм. Актуатор монтировался на передней кромке каверны. Он состоял из керамической вставки с наклеенными алюминиевыми электродами по обе стороны пластины. Высоковольтный электрод толщиной 0.05 мм располагался на расстоянии 5 мм от переднего края каверны, его ширина составляла 85 мм. С обратной стороны керамики находился заземленный электрод. Он изолировался диэлектрическим компандом.

Поле скоростей исследовалось с помощью системы PIV LaVision FlowMaster. Поток засеивался частицами масла диаметром ~ 1 мкм с временем динамической релаксации порядка 1–2 мкс. Частицы подсвечивались двумя последовательными лазерными импульсами с задержкой между ними ~ 2 мкс, лазерный нож толщиной 0.5 мм ориентировался вдоль направления потока в плоскости симметрии каверны. Изображения регистрировались камерой с разрешением 4 Мпикс, установленной перпендикулярно лазерному ножу. Обработка изображений велась кросскорреляционным методом с размером окна 32×32 пикс и перекрытием 50%. Результирующее разрешение векторных полей составило 0.5 мм в плоскости лазерного ножа. Результирующее поле скоростей получалось при осреднении 150 мгновенных кадров.

Колебания давления измерялись миниатюрным датчиком давления Kulite XT-140(M), который устанавливался по средней линии полости на задней стенке каверны в 2 мм от верхнего края (рис. 2). Затем через аналоговый фильтр сигнал

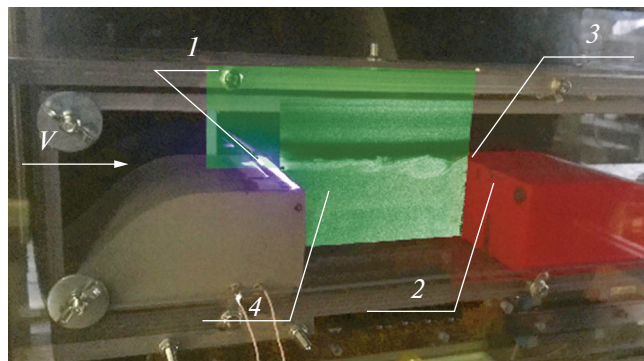


Рис. 1. Модель каверны в рабочей части аэродинамической трубы: 1 – плазменный БР-актуатор; 2 – датчик давления; 3 – задняя подвижная стенка тела вытеснения; 4 – лазерный нож системы PIV, подсвечивающий трассерные частицы (показано условно).

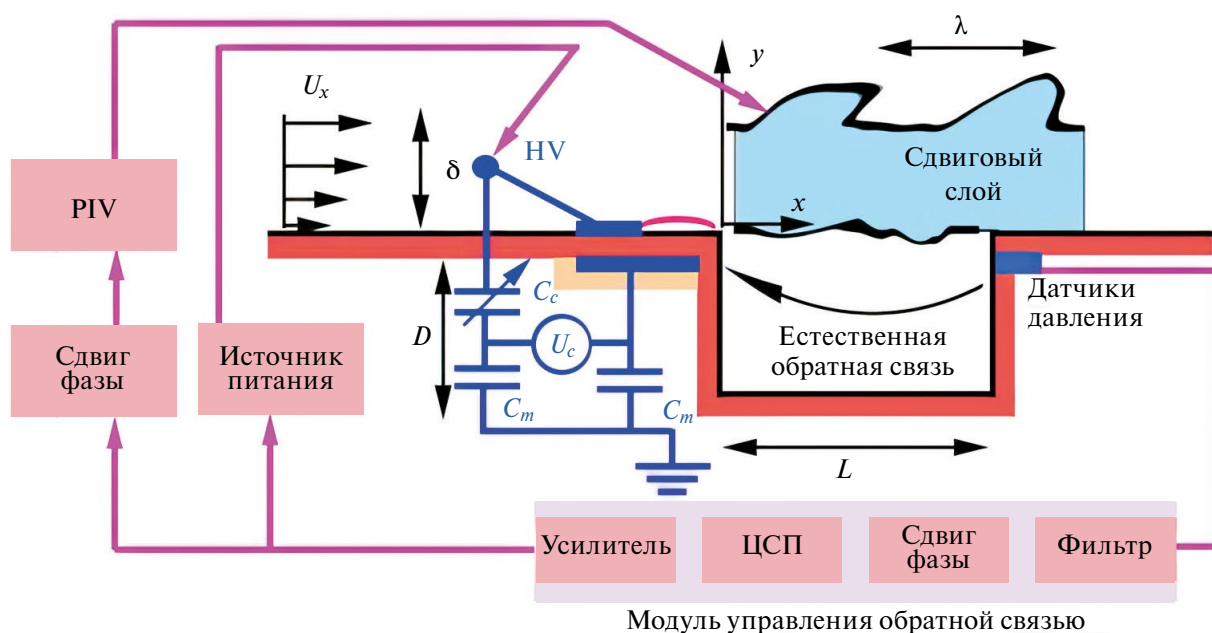


Рис. 2. Принципиальная схема обратной связи и фазовой автоподстройки частоты съемки PIV: ЦСП – цифровой сигнальный процессор.

поступал на вход модуля АЦП–ЦСП–ЦАП LCard E14-440. В модуле производилась обработка сигнала, заключающаяся в применении к его отсчетам фильтра с конечной импульсной характеристикой. Сигнал с полосовой фильтрацией был почти монохроматическим, соответствующим доминирующей моде с регулируемой фазовой задержкой по отношению к измерениям датчика давления. Преобразованный сигнал с фазовой задержкой ϕ использовался для модуляции амплитуды напряжения на разряде. Кроме того, он запускал систему PIV, позволявшую проводить фазово-осредненные измерения развития возмущения в резонансных условиях.

Для измерения и контроля мощности разряда был применен метод вольт-кулонных циклограмм, который заключается в анализе циклической зависимости переносимого в БР заряда от мгновенного значения приложенного к электродам напряжения [20–22]. Схема измерения приведена на рис. 2. Ответный электрод был подключен к измерительной емкости C_m номиналом 1 нФ. Согласно уравнению неразрывности тока, заряд, протекающий через разрядную ячейку, равен заряду емкости C_m . Для исключения из результатов измерений паразитного емкостного тока через систему электродов использовалась схема аналоговой компенсации в виде конденсаторного моста Уитстона. В верхнем плече его устанавливался перестраиваемый вакуумный конденсатор $C_c = 3\text{--}50$ пФ, емкость которого равнялась емкости электродной системы в отсутствие разряда. При такой схеме рассеиваемая в разряде мощность может быть вычислена как

$$P = fE_T = fC_m \oint U_c(t) dU(t),$$

где f – несущая частота приложенного напряжения, E_T – энерговклад в разряд за период питающего напряжения, $U_c(t)$ – разность напряжений на измерительных емкостях C_m . Для измерения $U_c(t)$ использовался дифференциальный пробник напряжения Pintek DP-150 (погрешность – 5%, полоса пропускания – 150 МГц). В данной работе значение E_T при зафиксированном значении амплитуды приложенного напряжения практически не изменялось в диапазоне частот, соответствующих глубине модуляции разряда. Погрешность измерения мощности данного метода оценивалась в 10%, аналогично работе [23].

Для управления транзисторным источником питания использована частотная модуляция сигнала. Основная частота разряда $f_{\text{gen}} = 127$ кГц была установлена выше резонансной частоты входного контура $f_{\text{res}} = 122$ кГц (рис. 3). Частота модуляции разряда была настроена на собственную частоту колебаний давления в полости. На первом этапе управление осуществлялось в разомкнутой системе. В качестве сигнала сдвига частоты модуляции использовался внутренний собственный синусоидальный сигнал генератора AWG-4082 с фиксированной амплитудой напряжения $U_{\text{CL_off}} = 5$ В. В этом случае сдвиг несущей частоты составил $df_{\text{car}} = 5$ кГц, так что

$$f_{\text{car}} = f_{\text{gen}} - df_{\text{car}} = f_{\text{res}}.$$

Амплитуда напряжения в режиме частотной модуляции U_m соответственно была постоянной и достигала 8 кВ. Типичный энерговклад в разряд составлял 130 Вт/м.

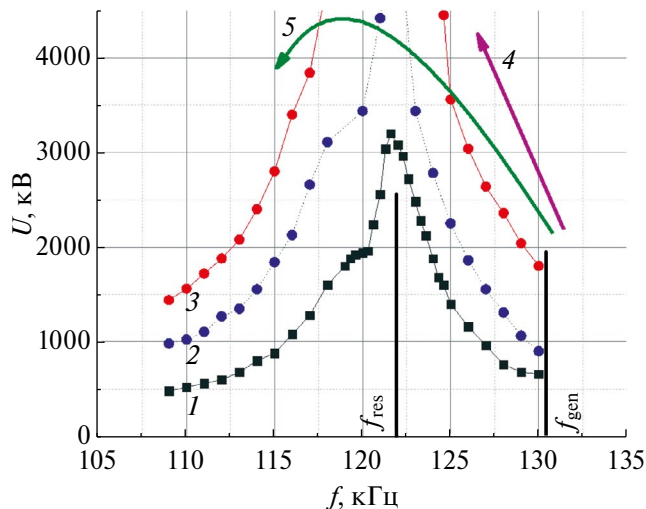


Рис. 3. Зависимость напряжения разряда от несущей частоты; входное напряжение на усилителе задано регулируемым автотрансформатором (50–160 В): 1 – 50 В, 2 – 100, 3 – 160; стрелки – режимы: 4 – линейный, 5 – нелинейный.

На втором этапе система работала в режиме обратной связи. Была осуществлена настройка управления обратной связью таким образом, чтобы сигнал источника питания был по возможности пропорционален сигналу амплитуды возмущения пульсаций давления. При этом напряжение на актуаторе было достаточным для воздействия на возмущения вблизи передней кромки, но не превышало пробойных значений диэлектрического компаунда. Поэтому было проанализировано распределение амплитуд пульсаций давления в сдвиговом слое каверны на частоте резонансного пика (рис. 4). Линейное воздействие актуатора на возмущения вблизи передней кромки было реализовано только для амплитуд возмущения менее 80% от максимального, эта область на рис. 4 выделена большим прямоугольником. Дальнейший рост амплитуды с 80 до 100% в нелинейном режиме приводил к снижению напряжения на электродах с 8 до 6 кВ, данная область выделена малым прямоугольником. Это происходило в 1% редких возмущений при условно некорректной работе системы. Влияние таких возмущений считалось незначительным. Таким образом, настройка режима частотной модуляции была реализована для управления амплитудами возмущения менее 80% от максимального значения (рис. 3, верхняя шкала). Сдвиг несущей частоты $df_{\text{свг}}$ был пропорционален выходу модуля LCard. В частности, если амплитуда датчика давления составляла 80% от максимальной, то напряжение сигнала модуляции соответствовало 3 В, а напряжение разряда – 8 кВ. Таким образом, несущая частота барьерного разряда преимущественно лежала в диапазоне

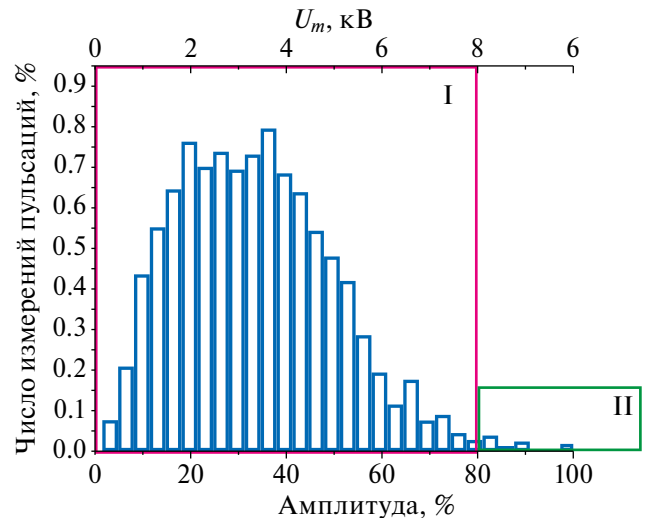


Рис. 4. Типичная гистограмма амплитуды пульсаций давления для резонансного пика каверны 817 Гц: I – линейный режим, II – нелинейный.

123–130 кГц (между вертикальными линиями на рис. 3), что соответствовало монотонной квазилинейной зависимости выходного напряжения на электродах актуатора от несущей частоты генератора. Этот диапазон показан стрелкой 4. Характерный энерговклад в разряд составлял 50 Вт/м.

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Детальное исследование течения в каверне было проведено для длин полости от 18 до 127 мм. На рис. 5 показаны картины течения, визуализированные неоднородностью засева пыли, а также поля скоростей, снятые на частоте резонансного пика методом фазовой задержки, и спектров пульсаций давления без активного управления актуатором. Приведена структура течения для глубокой, мелкой и переходной каверн. Видно, что каверна генерирует набор акустических тонов с максимальным уровнем звукового давления до 120–130 дБ. Самый низкий тон соответствует числу Струхала $St = 0.8$:

$$St = \frac{fV}{L},$$

где f – частота резонансного пика, V – скорость набегающего потока, L – длина каверны.

Изменение амплитуды пульсаций давления (АПД) в резонансных пиках по мере роста длины каверны представлено на рис. 6. При переходе модели от мелкой $L/D \gg 1$ к глубокой каверне происходит смещение доминирующей моды в сторону высоких частот. По мере дискретной перестройки течения, когда в полости укладывается $N - 1$ целое количество вихрей,

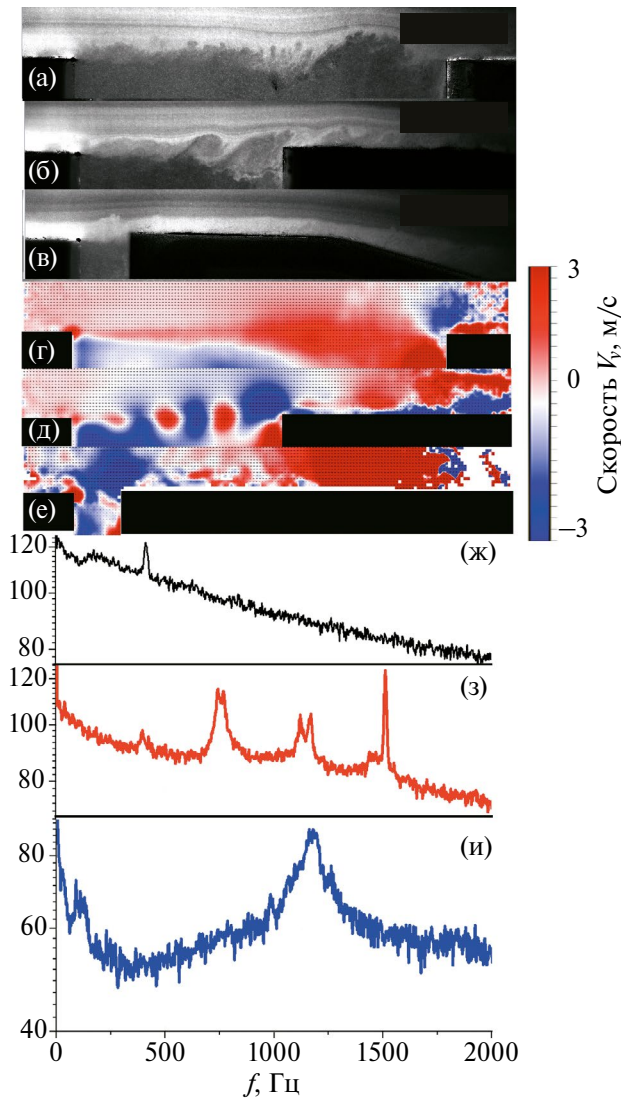


Рис. 5. Мгновенные кадры засева пыли (а)–(в), поля скорости V_y на резонансном пике (г)–(е), спектры пульсаций давления (ж)–(и) для каверны длиной: (а), (г), (ж) – 127 мм; (б), (д), (з) – 69; (в), (е), (и) – 18.

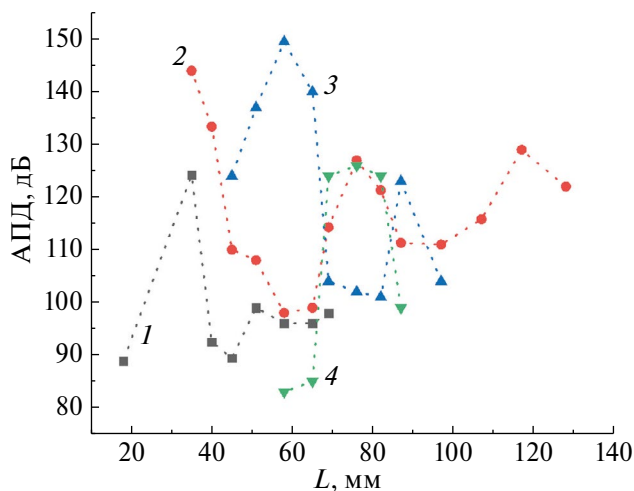


Рис. 6. Зависимости амплитуды пульсаций давления от длины каверны для различных резонансных пиков: 1 – $St = 0.7$, 2 – 1.4, 3 – 2.1, 4 – 2.8.

можно видеть подавление соответствующего этой моде резонансного пика и формирование нового основного резонанса. При этом стоит отметить, что ввиду осреднения сигнала датчиков давления на широком временном промежутке наблюдались перемежающиеся режимы, когда происходила поочередная перестройка течения между N и $N - 1$ модами.

Для реализации и исследования процесса подавления тона каверны был выбран режим с длиной резонатора 61.5 мм и скоростью потока 37 м/с. Число Рейнольдса, исходя из глубины полости 50 мм, составляло примерно 120 000. Поле средней скорости показано на рис. 7. Видна типичная структура течения в прямоугольной полости, включающая застойную зону и сдвиговый слой на ее границе. Нарастание сдвигового слоя показано на рис. 7б. У задней стенки его толщина достигает 10 мм.

Спектр пульсаций давления представлен на рис. 8. Собственные резонансные колебания обнаружены на частотах 490, 820 и 1325 Гц, которые соответствуют числам Струхала 0.57, 1.1 и 1.8. Фильтр в контуре обратной связи выборочно настраивался на определенный тон. Полоса пропускания фильтра составляла 127 Гц. Включение плазменного актуатора приводило к снижению резонансной амплитуды со 120 до 112 дБ при сдвиге фазы сигнала на 4.2 рад или увеличению ее амплитуды до 127 дБ, если сдвиг фазы составлял 6 рад. Следует отметить, что влияние плазменного актуатора на пики резонансов на частотах 490 и 820 Гц происходит независимо друг от друга. Возможны все четыре комбинации воздействия на резонансные пики: 1 – увеличение обоих резонансов, 2 – уменьшение резонансов, 3 – увеличение первого резонанса и уменьшение второго резонанса и 4 – обратный случай. Зажигание разряда в режиме отсутствия обратной связи на частоте 2140 Гц приводило к снижению обоих резонансных пиков со 120 до 110 Гц. Очевидно, что независимое управление различными модами в отсутствие обратной связи невозможно. Нерезонансная частота модуляции приводила к инициализации асинхронного схода вихрей, что в итоге нарушало систему естественной обратной связи. Это способствовало перераспределению энергии между модами. Так, на частоте 840 Гц отчетливо виден рост амплитуды пульсаций со 100 до 110 дБ.

Визуализация структуры сдвигового слоя течения в каверне представлена на рис. 9. Вертикальная составляющая скорости потока показана в дискретном виде. Поля скорости получены осреднением 150 мгновенных кадров с одинаковой фазовой задержкой относительно опорного сигнала датчика давления. Длину волны

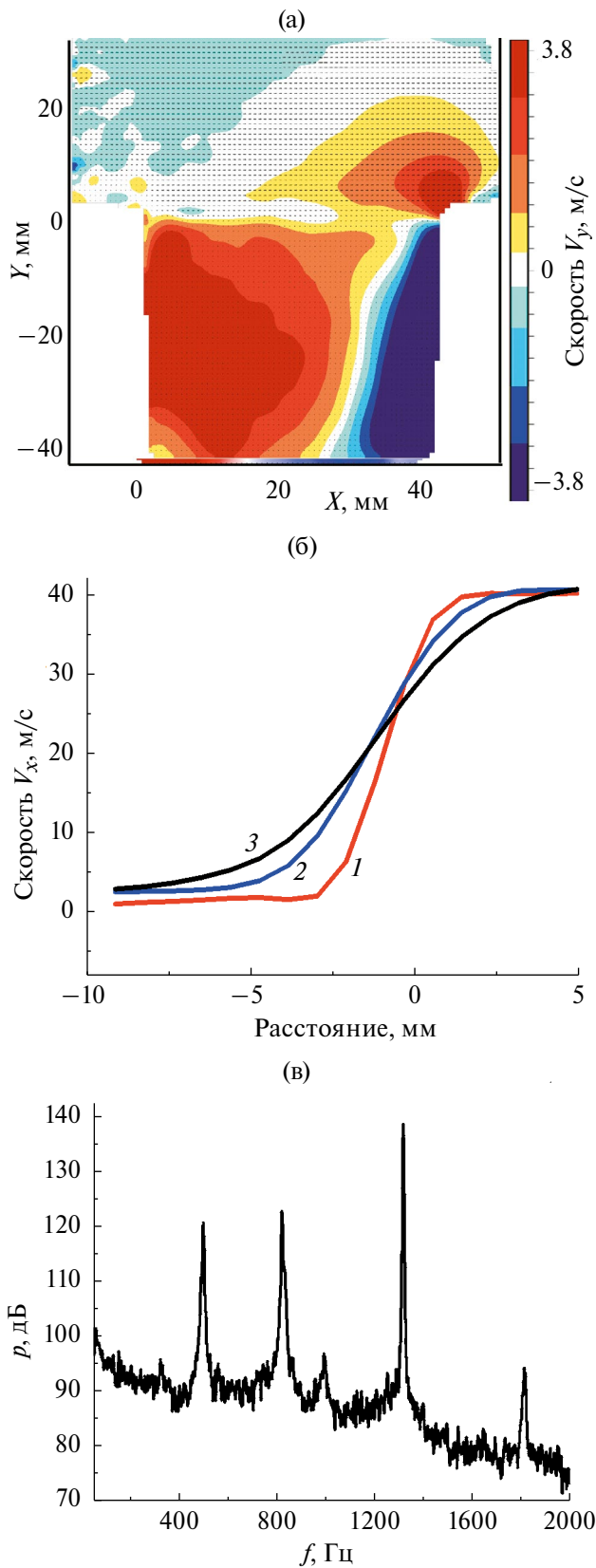


Рис. 7. Структура течения каверны в отсутствие управления (а); профили скорости в сдвиговом слое (б): 1 – $x = 10$ мм, 2 – 20, 3 – 40; спектр пульсаций давления в каверне (в).

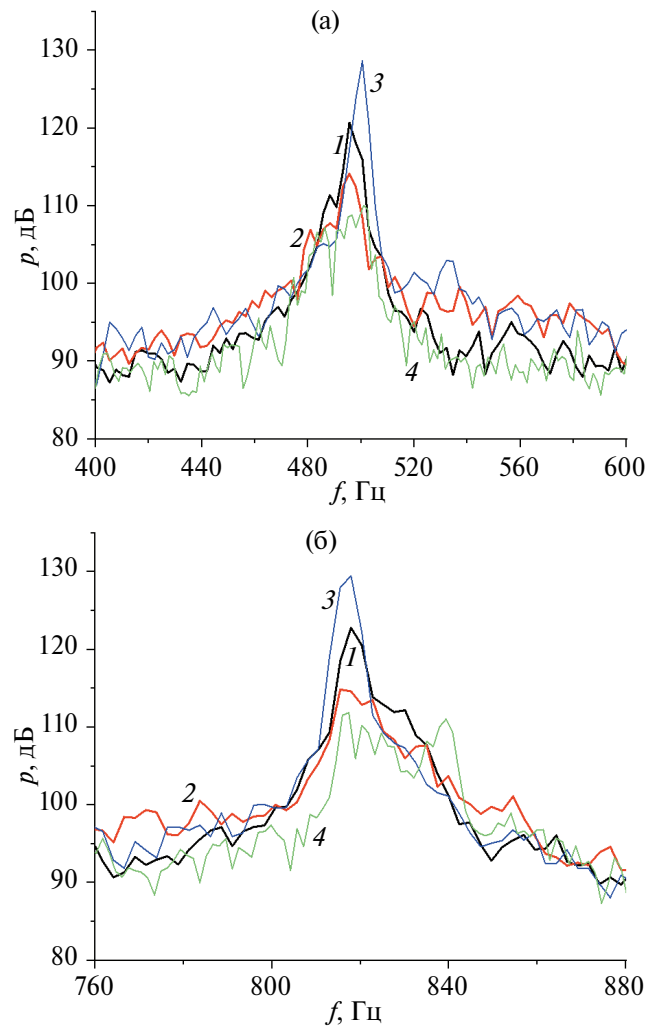


Рис. 8. Спектр пульсаций давления при выключенном (а) и включенном (б) актуаторе в режимах раскачки ($\varphi = 6.0$ рад) и подавления ($\varphi = 4.2$ рад) возмущений вблизи резонансных частот $f = 490$ (а) и 820 Гц (б): 1 – разряд выключен; 2, 3 – разряд включен, режим обратной связи при $\varphi = 4.2$ и 6.0 соответственно; 4 – разряд включен без обратной связи, $f_{\text{mod}} = 2100$ Гц.

возмущения можно измерить, наблюдая за эволюцией движения вихревых структур. У передней кромки длина волны составляет 15 мм. По мере движения по течению длина волны возмущения растягивается до 20 мм. Отчетливо видно, что в выделенной кругом области сдвигового слоя вертикальная компонента скорости в случае невозбужденного потока отлична от режимов подавления и раскачки. Структуры течения в высокоскоростной области вне каверны и внутри каверны изменились незначительно.

Более подробный анализ может быть проведен из непосредственных данных вертикальной компоненты скорости в сдвиговом слое рис. 10а. По мере движения жидкости по потоку происходит раскачка возмущений, однако инкремент нарастания для разных режимов разный. Эволюция

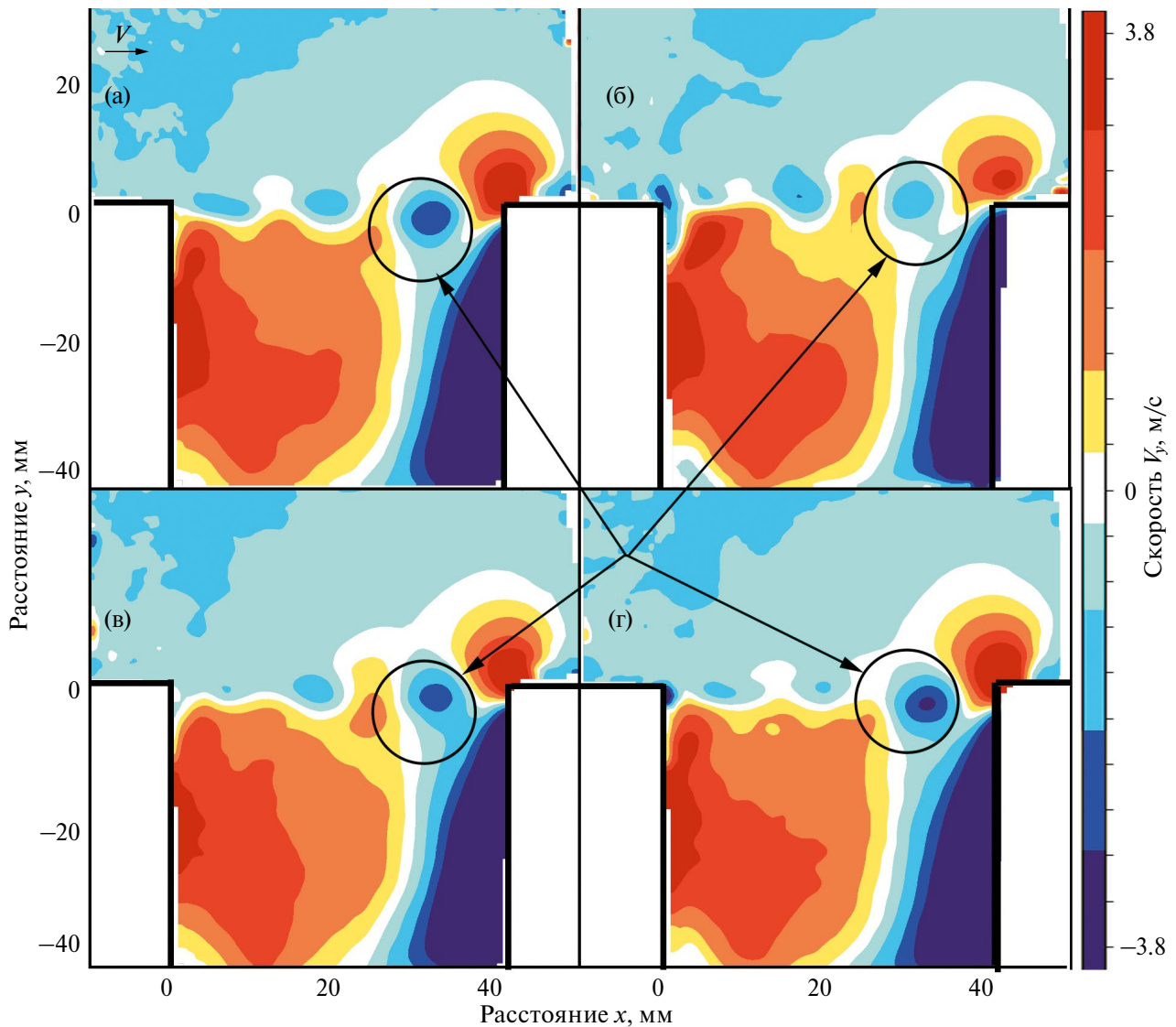


Рис. 9. Мгновенное поле скоростей в сдвиговом слое каверны: (а) – разряд выключен; (б) – разряд включен, $f = 2140$ Гц, режим обратной связи отсутствует; (в) – разряд включен, $\phi = 4.2$, режим подавления; (г) – разряд включен, $\phi = 6.0$, режим раскачки.

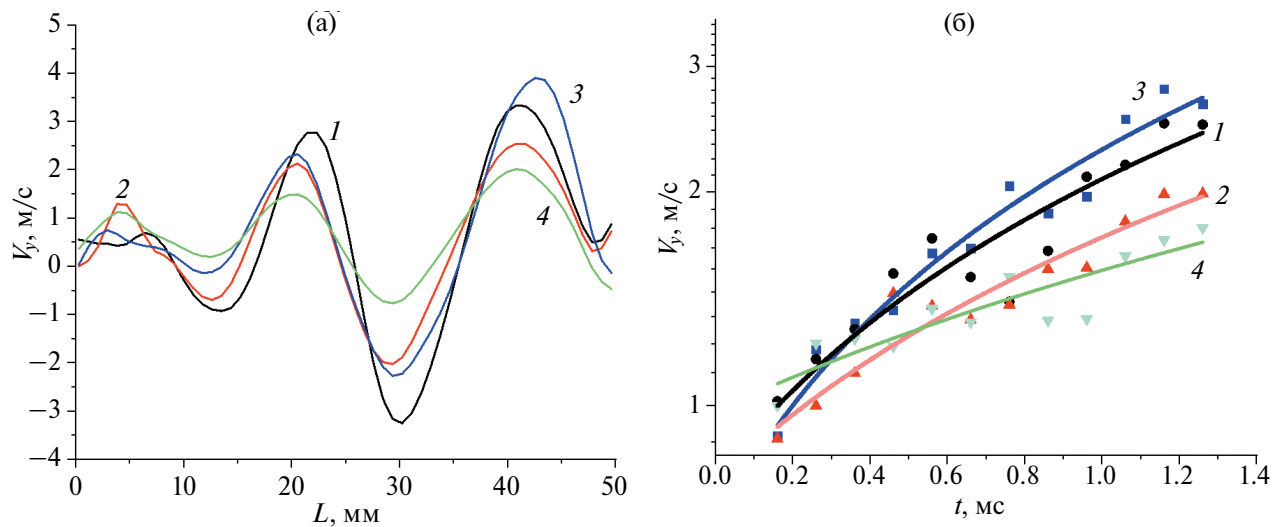


Рис. 10. Распределение вертикальной составляющей скорости в сдвиговом слое по длине каверны (а); эволюция нарастания вертикальной составляющей скорости в сдвиговом слое (б): 1–4 – как на рис. 8.

амплитуды скорости в сдвиговом слое показана на рис. 106. Ее можно аппроксимировать линейно. Амплитуды возмущений для режима подавления с обратной связью и без нее отличаются несущественно. Также видно, что амплитудная пульсация не насыщается и, по-видимому, продолжает расти на определенном участке по потоку от задней кромки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована структура потока в прямоугольной открытой полости с дозвуковой скоростью 37 м/с ($M = 0.11$). Показано, что каверна генерирует набор акустических тонов с максимальным уровнем звукового давления до 120–130 дБ. По мере уменьшения длины каверны происходило смещение резонансных колебаний в сторону более высоких частот. При этом изменение количества периодов крупномасштабных возмущений приводило к формированию нового резонансного пика, кратного доминирующей структуре вихревых течений.

Управление структурами течения сдвигового слоя осуществлялось на каверне длиной 61.5 мм. Было обнаружено наличие трех резонансных пиков. Вблизи передней кромки зажегся барьерный разряд в режиме обратной связи и без нее. Зажигание разряда на частоте 2160 Гц в отсутствие обратной связи привело к снижению двух резонансных пиков со 120 до 12 дБ. Генерация высокочастотных возмущений способствовала, по-видимому, нарушению организации естественных возмущений, согласованных с акустикой задней кромки каверны. Работа актуатора в режиме обратной связи вносила возмущения в фазе ($\varphi = 6.0$, режим раскачки) к естественным возмущениям либо в противофазе к ним ($\varphi = 4.2$, режим подавления). Снижения амплитуды пульсаций давления в режимах с обратной связью и без нее существенно не различались. При этом стоит отметить, что использование режима обратных связей позволило уменьшить энергозатраты в разряд в 2.5 раза до 50 Вт/м.

Визуализация течения показала, что разряд не влияет существенным образом на структуру потока внутри каверны и за ее пределами в высокоскоростной области течения. Однако модуль вертикальной компоненты скорости в сдвиговом слое коррелирует с амплитудой резонансного пика для картин течения, полученных с фазовой задержкой на соответствующих частотах. Полученные эволюции распространения вихревых структур в сдвиговом слое позволяют утверждать, что насыщения раскачки возмущений не наблюдается ни в одном из режимов, а значит, возможно дополнительное

воздействие на петлю естественной обратной связи для дальнейшего снижения амплитуды резонансных колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-00353.

Автор благодарит И.А. Моралева за участие в обсуждении основных результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruggeman J.C., Hirschberg A., van Dongen M.E.H., Wijnands A.P.J., Gorter J. Self-sustained Aero-acoustic Pulsations in Gas Transport Systems: Experimental Study of the Influence of Closed Side Branches // *J. Sound Vib.* 1991. V. 150. № 3. P. 371.
2. Cui P., Zhou G., Zhang Y. et al. Improved Delayed Detached-eddy Investigations on the Flow Control of the Leading-edge Flat Spoiler of the Cavity in the Low-aspect-ratio Aircraft // *Aerospace*. 2022. V. 9. № 9. P. 1.
3. Bower W.W., Kibens V., Cary A. et al. High-frequency Excitation Active Flow Control for High-speed Weapon Release (HIFEX) // 2nd AIAA Flow Control Conf. 2004. № 2513. P. 1.
4. Sarohia V., Massier P.F. Control of Cavity Noise // *J. Aircr.* 1977. V. 14. № 9. P. 833.
5. Kook H., Mongeau L., Brown D.V., Zorea S.I. Analysis of the Interior Pressure Oscillations Induced by Flow over Vehicle Openings // *Noise Control Eng. J.* 1997. V. 45. № 6. P. 223.
6. Rossiter J.E. Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds. 1964. <http://repository.tudelft.nl/view/aereports/uuid:a38f3704-18d9-4ac8-a204-14ae03d84d8c/>
7. Bilanin A.J., Covert E.E. Estimation of Possible Excitation Frequencies for Shallow Rectangular Cavities // *AIAA J.* 1973. V. 11. № 3. P. 347.
8. Tam C.K.W., Block P.J.W. On the Tones and Pressure Oscillations Induced by Flow over Rectangular Cavities // *J. Fluid Mech.* 1978. V. 89. № 2. P. 373.
9. Sarohia V. Experimental Investigation of Oscillations in Flows over Shallow Cavities in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1975. P. 114.
10. Shaw L., Clark R., Talmadge D. F-111 Generic Weapons Bay Acoustic Environment // *J. Aircr.* 1988. V. 25. № 2. P. 147.
11. Chen Y., Cai L., Jiang D., Li Y., Wang S. Experimental and Numerical Investigations for Dual-cavity Tip Aerodynamic Performance in the Linear Turbine Cascade // *Aerospace*. 2023. V. 10. № 2. P. 193.
12. Терехов В.И., Калинина С.В., Шаров К.А. Особенности течения и теплообмена при взаимодействии струи с преградой в форме сферической каверны со скругленной кромкой // *TBT*. 2012. Т. 50. № 2. С. 318.
13. Kibens V. Discrete Noise Spectrum Generated by Acoustically Excited Jet // *AIAA J.* 1980. V. 18. № 4. P. 434.
14. Stanek M.J., Raman G., Ross J. et al. High Frequency Acoustic Suppression – The Role of Mass Flow, the

- Notion of Superposition, and the Role of Inviscid Instability – A New Model (Part II) // AIAA Paper 2002-2404. 2002.
15. *Cattafesta L., Garg S., Choudari M., Li F.* Active Control of Flow-induced Cavity Resonance // AIAA-97-1804. 1997.
 16. *Shaw L., Northcraft S.* Closed Loop Active Control for Cavity Acoustics // 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf. Exhib. 1999. P. 683.
 17. *Chan S., Zhang X., Gabriel S.* Attenuation of Low-speed Flow-induced Cavity Tones Using Plasma Actuators // AIAA J. 2007. V. 45. № 7. P. 1525.
 18. *Webb N., Samimy M.* Control of Supersonic Cavity Flow Using Plasma Actuators // AIAA J. 2017. V. 55. № 10. P. 3346.
 19. *Semenev P.A., Toktaliev P.D.* Numerical Modeling of Plasma Actuator Operational Process Based on Dielectric Barrier Discharge // Aviat. Engines. 2020. V. 1. № 1. P. 49.
 20. *Manley T.C.* The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge // Trans. Electrochem. Soc. 1943. V. 84. № 1. P. 83.
 21. *Kriegseis J., Möller B., Grundmann S., Tropea C.* Capacitance and Power Consumption Quantification of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators // J. Electrostat. 2011. V. 69. № 4. P. 302.
 22. *Пашин М.М.* Измерение энергозатрат в озонаторах с объемным барьерным разрядом // Электричество. 2011. № 1. С. 21.
 23. *Селивонин И.В.* Модификация электродов в диэлектрическом барьерном разряде и ее влияние на разряд. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ОИВТ РАН, 2022. 161 с.