

03.3

Визуализация потока в каверне с активным управлением с помощью актуатора диэлектрического барьерного разряда

© П.Н. Казанский, И.В. Селивонин, И.А. Моралев

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: fokkoo@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 14 октября 2022 г.

Принято к публикации 18 октября 2022 г.

Представлены результаты управления пульсациями гидродинамического давления с помощью плазменного актуатора на основе диэлектрического барьерного разряда в прямоугольной каверне с острыми кромками. Исследование проводилось при скорости набегающего потока $V_\infty = 37$ м/с. Разряд был организован вблизи передней кромки каверны. Средняя энергия импульса разряда составляла 0,03 Дж, при этом его длительность была равна 1 мс, а частотная модуляция реализовалась на естественных резонансных частотах каверны (500, 817, 1317 Hz) и высокой частоте 2160 Hz, не соответствовавшей естественному резонансному пику давления. Пульсации давления измерялись датчиком давления Kulite. Установлено, что режим разряда влияет на пульсации давления в каверне. Амплитуда давления на задней стенке каверны (118 dB) может быть увеличена до 128 dB или уменьшена до 108 dB, если доминирующая или более высокие моды раскачиваются разрядом. Визуализация PIV была организована в режиме фазовой синхронизации. Спектр давления соответствует величине когерентных структур в сдвиговом слое каверны.

Ключевые слова: плазменный актуатор, каверна, активное управление, диэлектрический барьерный разряд, пограничный слой, слой смещения, обратная связь.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53951.19364

Течение в кавернах в последние десятилетия вызывает большой интерес в связи с прикладными [1] и научными задачами. Структура течения в кавернах вследствие сложного процесса обратной связи подвержена автоколебаниям на дискретном наборе частот (моды Rossiter) [2]. В пограничном слое вблизи передней кромки каверны возникают вихревые структуры. Они усиливаются в сдвиговом слое и рассеиваются на нижней по потоку стенке каверны. Это создает акустические возмущения. Акустические возмущения распространяются вверх по потоку внутри каверны и возбуждают сдвиговый слой вблизи передней кромки. Это приводит к замыканию петли обратной связи. Влияние конечных размеров сдвигового слоя и глубины каверны учитывалось в [3] при определении резонансных частот. Этот естественный механизм обратной связи лежит в основе принципа активного управления потоком в каверне.

Управление тонами резонатора изучается более полувека [4]. Наибольшее распространение в практическом использовании нашли пассивные устройства для снижения высоких уровней звукового давления [5]. Однако активные методы управления потоком широко изучаются и находят свои ниши применения. Неполный перечень типов используемых актуаторов включает стационарные и нестационарные струи [6], пьезоклапаны [7], жидкостные генераторы [8], синтетические струи [9], а также плазменные актуаторы, в том числе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) [10].

Общий подход предполагает модификации передней кромки, такие как шевроны, а также использование

вихрегенераторов, изменяющих свойства устойчивости сдвигового слоя. Альтернативой этому является активное возбуждение сдвигового слоя с целью нелинейного взаимодействия между модами резонатора или замкнутого контура управления. Последняя концепция была реализована с помощью механических устройств [7] при числе Маха $M = 0.2$. Синтетические струи с нулевым массовым расходом успешно использовались с аналоговой системой обратной связи при числах Маха от 0.2 до 0.55 [11]. В [12] исследовался обмен энергией между первыми тремя модами в каверне и был сделан вывод, что актуатор с обратной связью необходим для подавления различных мод неустойчивости.

Для инициирования межмодовых взаимодействий в резонаторе использовались локализованные плазменные нити в дозвуковых [13] и сверхзвуковых [14] течениях. Для манипулирования структурой сдвигового слоя использовался барьерный разряд при скоростях потока 10–20 м/с [15].

Цель настоящей работы — управление потоком с помощью ДБР-актуатора на передней кромке каверны. Представлялось важным связать уменьшение резонансной пульсации давления и вихревой структуры в сдвиговом слое потока в случае зажигания ДБР и без него.

Экспериментальные исследования проводились в дозвуковой аэродинамической трубе ОИВТ РАН. Она имела конструкцию разомкнутого контура с коэффициентом поджатия 16:1 от успокоительной камеры до рабочей части. Максимальная скорость потока в рабочей части может достигать 70 м/с. Рабочий участок имел

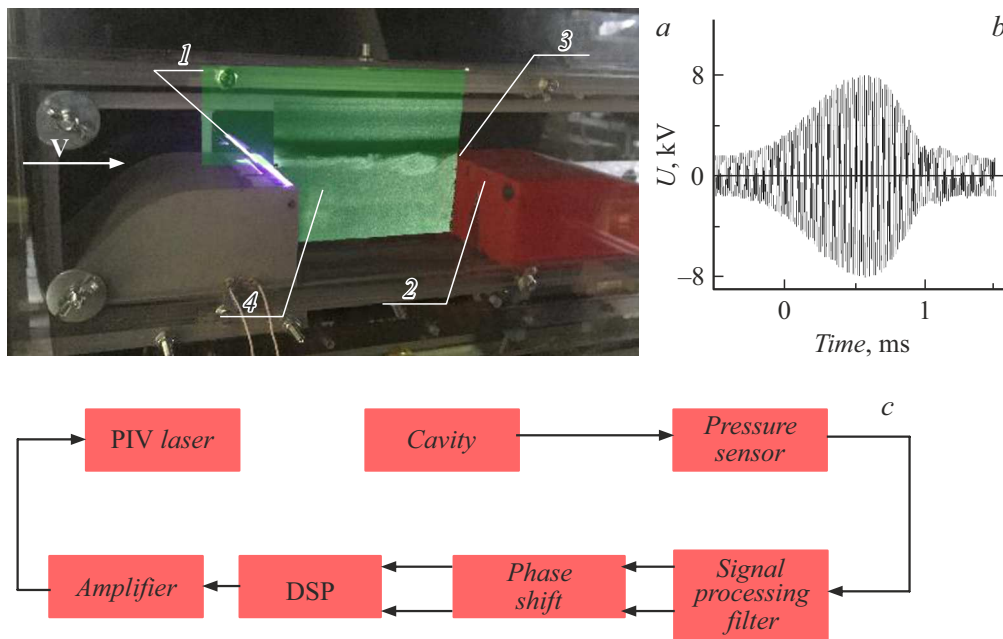


Рис. 1. *a* — схема измерения пульсаций давления и поля скоростей методом PIV в каверне: 1 — керамическая вставка, 2 — сканер давления, 3 — вставка диффузора, 4 — лазерный нож; *b* — типичная осциллограмма напряжения плазменного актуатора; *c* — принципиальная схема фазовой автоподстройки частоты.

сечение $0.1 \times 0.1 \text{ m}$ и длину 0.8 m (рис. 1, *a*). Рабочая часть была изготовлена из плексигласа со стеклянной вставкой, что обеспечивало оптический доступ к камере и общий контроль эксперимента. Глубина полости составляла 50 mm , а длина регулировалась в широком диапазоне ($0\text{--}240 \text{ mm}$) путем смещения вставки диффузора. Для демонстрации наибольшего подавления сигнала в резонансных пиках пульсаций давления основные результаты были получены при отношении длины каверны ($L = 61.5 \text{ mm}$) к глубине ($W = 50 \text{ mm}$) $L/W = 1.23$. При условном разделении каверн на глубокие ($L/W \ll 1$) и мелкие ($L/W \gg 1$) данная конфигурация относится к переходному типу. Керамическая вставка с алюминиевыми электродами устанавливалась заподлицо с обтекаемой поверхностью передней кромки каверны. Высоковольтный электрод имел длину 85 mm и толщину 0.05 mm , расстояние между электродами и краем каверны составляло 5 mm . На внутренней стороне керамики устанавливался заземляющий электрод. Он был залит диэлектрическим компаундом, чтобы избежать паразитного пробоя за пределами рабочей области передней кромки. Эксперимент проводился при температуре 293 K и атмосферном давлении. Скорость набегающего потока составляла $V = 37 \text{ m/s}$. Электроды были установлены под углом 90° к потоку.

Колебания давления измерялись миниатюрным датчиком давления Kulite XT-140(M), который устанавливался по средней линии полости на задней стенке каверны в 2 mm от верхнего края. Затем через аналоговый фильтр сигнал поступал на вход модуля аналого-цифровой преобразователь–цифровой сиг-

нальный процессор–цифро-аналоговый преобразователь (АЦП–ЦСП–ЦАП). 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 Rossiter ($f = 500 \text{ Hz}$) с регулируемой фазовой задержкой по отношению к измерениям датчика давления. Преобразованный сигнал запускал систему PIV, позволявшую проводить фазовое измерение развития возмущения в резонансных условиях (рис. 1, *c*).

Разряд возбуждался синусоидальным напряжением частотой 144 kHz и амплитудой до 8 kV (рис. 1, *b*). Частотная модуляция разряда настраивалась на собственную частоту каверны: 500 , 817 или 1317 Hz . Средняя мощность разряда соответствовала 130 W/m .

Спектр мощности пульсаций давления показан на рис. 2, *a*. Видно, что каверна генерирует набор акустических тонов с максимальным уровнем звукового давления до $120\text{--}140 \text{ dB}$. Самый низкий тон соответствует числу Струхала

$$St = \frac{fL}{V} = 0.8.$$

В изучаемых условиях доминирующей оказывается третья мода, однако изменения пульсаций давления на этой частоте при работе актуатора оставались в рамках ошибки измерения. Поэтому большая часть исследований выполнена при управлении первой модой (500 Hz).

Возбуждение каверны осуществлялось вокруг первой моды (в диапазоне частот $450\text{--}550 \text{ Hz}$). Подробные спектры вокруг пика показаны на рис. 2, *b*. Хорошо вид-

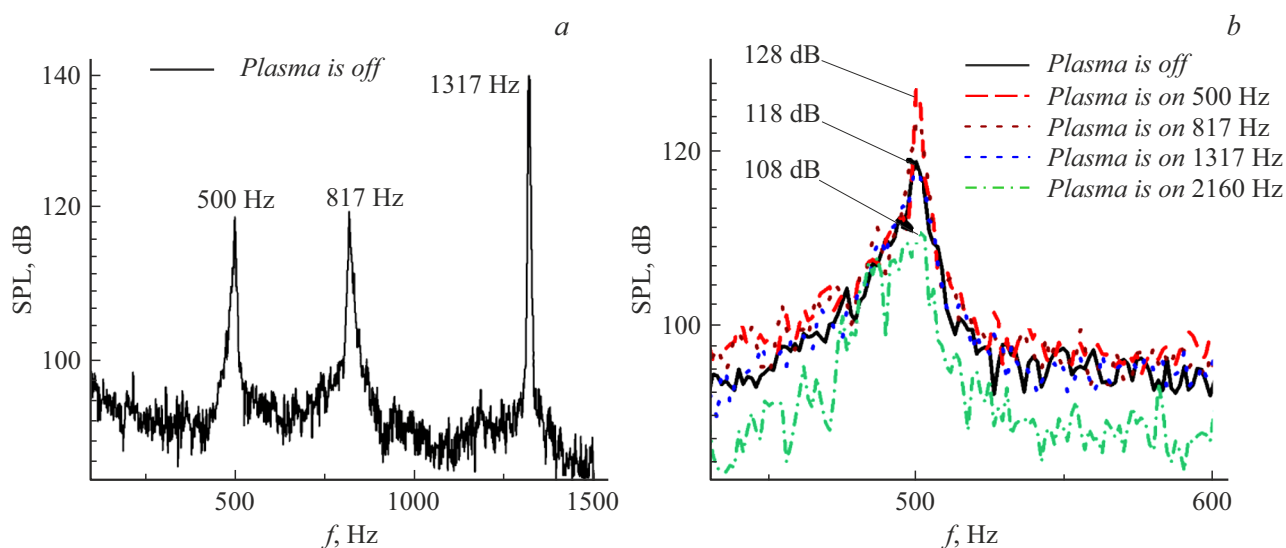


Рис. 2. Типичные спектры давления для невозмущенного потока (а) и потока при различных частотах модуляции разряда ДБР-актуатора (b).

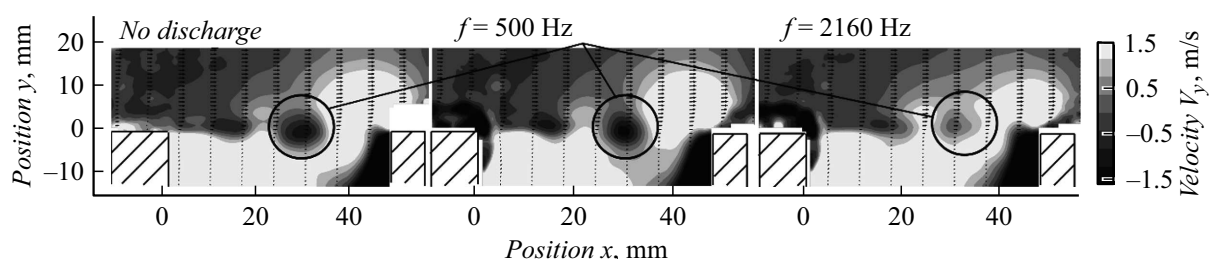


Рис. 3. Визуализация невозмущенного потока и возбуждения сдвигового слоя на частотах 500 и 2160 Гц.

но, что плазменный актуатор может возбудить полость с максимальным увеличением амплитуды давления на 10 dB при резонансном возбуждении.

Также было показано, что при возбуждении каверны на высокой частоте модуляции происходит привязка колебаний к частоте накачки. Нерезонансная модуляция разряда на высокой частоте 2160 Hz приводит к инициации асинхронного схода вихрей с передней кромки и тем самым к нарушению цепочки естественной обратной связи, что в конечном счете способствует перераспределению энергии между модами. Таким образом, амплитуда доминирующего тона уменьшается на 10 dB.

Поле скоростей исследовано с помощью системы PIV LaVision FlowMaster, которая подробно описана в [16]. Результирующее поле скоростей было получено усреднением по 400 мгновенным кадрам. Кадры были синхронизированы по фазе с отфильтрованным сигналом давления (500 Hz).

Полученные поля течения на рис. 3 ясно показывают разницу между невозмущенным течением (режим а) и режимом возбуждения (режим b), а также режимом подавления (режим c). Видно, что интенсивность и геометрия вихря изменяются в следе вблизи нижней по потоку стенки, а именно циркуляция и размер вихря

для режимов а, b, с составили 368, 370, 365 м²/с и 11, 12, 4,6 мм соответственно.

Следует подчеркнуть, что для понимания причин усиления пульсаций давления в каверне на одних частотах работы актуатора и их ослабления на других нужно учесть, что немаловажную роль играет свойство избирательного усиления сдвигового течения, которое приводит к большему усилению одних возмущений по сравнению с другими. Важное дополнительное условие возникновения колебаний большой амплитуды лучше всего описывается в терминах эффективной обратной связи. Эта обратная связь, которая по существу представляет собой распространение возмущений вверх по потоку, усиливается наличием нижнего края резонатора. Возмущения давления, исходящие от нижнего по потоку края полости (или вблизи него), вызывают флуктуации завихренности вблизи начала чувствительного слоя сдвига. Такие флуктуации в свою очередь создают дополнительные возмущения, которые в дальнейшем усиливаются в сдвиговом слое, и т.д. Для выявления преобладания одного аспекта механизма возбуждения течения в каверне над другим необходимо провести дополнительные исследования.

Финансирование работы

Разработка модели каверны, спектральные измерения давления и визуализация PIV выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00353), а разработка модуля АЦП–ЦСП–ЦАП — при поддержке Министерства науки и высшего образования (№ 075-01056-22-00).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.C. Bruggeman, A. Hirschberg, M.E.H. van Dongen, A.P.J. Wijnands, J. Gorter, *J. Sound Vib.*, **150** (3), 371 (1991). DOI: 10.1016/0022-460X(91)90893-O
- [2] J.E. Rossiter, *Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds* (1964) [Электронный ресурс]. <http://repository.tudelft.nl/view/aereports/uuid:a38f3704-18d9-4ac8-a204-14ae03d84d8c/>
- [3] A.J. Bilanin, E.E. Covert, *AIAA J.*, **11** (3), 347 (1973). DOI: 10.2514/3.6747
- [4] N.A. Committee, F.O.R. Aeronautics, *Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces*, NACA TN-3487 (1955), p. 1–36 [Электронный ресурс]. <https://edit.texashistory.unt.edu/ark:/67531/metadc57843/?q=1100474424>.
- [5] H. Heller, D. Bliss, in *2nd Aeroacoustics Conf.* (Hampton, VA, USA, 1975). DOI: 10.2514/6.1975-491
- [6] L. Shaw, S. Northcraft, in *5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf. and Exhibit* (Bellevue, WA, USA, 1999), p. 683. DOI: 10.2514/6.1999-1902
- [7] L. Cattafesta, III, S. Garg, M. Choudhari, F. Li, in *28th Fluid Dynamics Conf.* (Snowmass Village, CO, USA, 1997), AIAA-97-1804. DOI: 10.2514/6.1997-1804
- [8] G. Raman, E. Envia, T. Bencic, in *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, NV, USA, 1999), AIAA-99-0604. DOI: 10.2514/6.1999-604
- [9] D. Fabris, D. Williams, in *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, NV, USA, 1999), AIAA-99-0605. DOI: 10.2514/6.1999-605
- [10] I.V. Selivonin, A.V. Lazukin, I.A. Moralev, S.A. Krivov, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **27** (8), 085003 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aacbf5
- [11] M. Kegerise, E. Spina, L. Cattafesta, III, in *30th Fluid Dynamics Conf.* (Norfolk, VA, USA, 1999), AIAA-99-3705. DOI: 10.2514/6.1999-3705
- [12] D. Williams, D. Fabris, K. Iwanski, J. Morrow, in *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, NV, USA, 2000), AIAA-2000-0470. DOI: 10.2514/6.2000-470
- [13] S. McGrath, L. Shaw, Jr., in *Fluid Dynamics Conf.* (New Orleans, LA, USA, 1996), AIAA-96-1949. DOI: 10.2514/6.1996-1949
- [14] N. Webb, M. Samimy, *AIAA J.*, **55** (10), 3346 (2017). DOI: 10.2514/1.J055720
- [15] S. Chan, X. Zhang, S. Gabriel, *AIAA J.*, **45** (7), 1525 (2007). DOI: 10.2514/1.26645
- [16] I. Moralev, P. Kazanskii, V. Biturin, A. Bocharov, A. Firsov, E. Dolgov, S. Leonov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53** (42), 425203 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/AB9D5A