

УДК 533.6.01, 62-503.5
DOI: 10.63430/TIA202502007

Исследование динамики крупных вихрей в ближней области свободной осесимметричной струи при локальном пульсирующим вдуве в соосном и поперечном направлениях*

М.И. Сорокин¹, Д.А. Кушнарв¹, М.П. Токарев^{1,2}, В.М. Дулин^{1,2}

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: m.sorokin1204@gmail.com

Проведена оптическая диагностика пространственной структуры крупных вихрей в ближней зоне турбулентной струи (при $Re = 5000$), истекающей из сопла круглой формы, в случае организации соосных периодических возмущений потока через кольцевые щели на кромке сопла и через отверстия на внутренней поверхности сопла в поперечном направлении. Внешнее воздействие привело к быстрой турбулизации потока вблизи кромки сопла за счет генерации крупных вытянутых тороидальных вихрей для соосных возмущений, а также вследствие существенной перестройки потока с быстрым разрушением ядра струи в случае возмущения в поперечном направлении.

Ключевые слова: PIV-метод (Particle Image Velocimetry), POD-метод (Proper Orthogonal Decomposition), крупные вихри, свободная струя, активное управление.

Введение

Исследования динамики крупномасштабных вихревых структур и механики теплопереноса в струйных течениях актуальны ввиду их частого применения в различных технических приложениях (химических реакторах, газотурбинных и ракетных двигателях). В частности, одним из важных факторов при сжигании топлива в струйном факеле является эффективность перемешивания струи с окружающим окислителем. Важную роль в этом процессе играют мелкомасштабные вихревые структуры, которые на начальном участке струи образуются в результате взаимодействия и дробления крупномасштабных вихревых структур, формирующихся из-за сдвиговой неустойчивости потока струи. Интенсифицировать процесс перемешивания можно путем принудительного разрушения крупномасштабных вихревых структур, методами пассивного и активного управления развитием гидродинамической неустойчивости.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-79-33008).

Пассивное управление подразумевает изменение геометрии сопла, например, формы выходного сечения сопла или установки малоразмерных генераторов вихрей, создающих локальную неоднородность потока [1, 2]. К активным способам управления относятся воздействие акустическим полем, возмущение расхода струи, организация локального вдува/отсоса, установка электромеханических актуаторов и др. При этом в связи с развитием программно-аппаратного обеспечения методы активного управления являются более перспективными ввиду возможности управления в режиме с обратной связью.

Работа [3], например, посвящена экспериментальному исследованию по увеличению струйного перемешивания, в котором использовались одна мини-струя, направленная радиально в сторону противоположной стенки круглого сопла, управляемая быстрым электромагнитным клапаном, и два термоанемометрических датчика для контроля состояния потока в реальном времени. В результате получено, что управление с обратной связью одной поперечной струей с поиском наилучшего режима алгоритмом машинного обучения не улучшало перемешивание по сравнению с классическим периодическим высокочастотным вдувом. Работа [4] была посвящена повышению производительности уже с помощью шести мини-струй. В результате с применением алгоритма линейного генетического программирования [5] получен комбинированный режим. Этот режим управления способствовал созданию новой структуры турбулентного потока, имеющей сильные колебания и закрутку, что приводило к увеличению перемешивания на 54, 47 и 28 % по сравнению с осесимметричным, спиральным и машущим режимами управления.

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ влияния локального пульсирующего вдува на динамику крупномасштабных кольцевых вихрей в струе, организованной осесимметричным сужающимся соплом с возможностью вдува через кромку сопла в направлении струи или на внутренней поверхности сопла перпендикулярно направлению основного потока. Экспериментальное исследование выполнено с использованием метода анемометрии по изображениям частиц (англ. Particle Image Velocimetry, PIV) и на основе скоростной визуализации в световом «ноже».

Описание эксперимента

Измерения проводились на струйном стенде, изготовленном с применением аддитивных технологий — 3D-печати по пластику методом наплавления. Схема рабочего участка показана на рис. 1а. Подведенный воздух, проходя через систему решеток, равномерно распределяется по всей площади сечения внутри сопла и выравнивается с помощью хонейкомба и детурбулизирующей сетки. Выходом из сопла является конфузур с переходом на меньшее сечение (отношение площадей равнялось 64). Все элементы экспериментального участка были предварительно рассчитаны и изготовлены таким образом, чтобы скорость на выходе из сопла имела ударный профиль скорости [6]. Наличие специального паза на конфузуре позволяет устанавливать различные насадки на выходе из сопла для организации как активного, так и пассивного управления.

Оптическая конфигурация PIV-системы (ООО «Сигма-Про») показана на рис. 1б. Для проведения PIV-измерений поток был засеян каплями глицерина с использованием специального устройства на основе сопла Ласкина. Частицы-трассеры размером порядка 5 мкм освещались в продольной плоскости потока двойным импульсным лазером EverGreen с энергией в импульсе до 200 мДж. Для съемки частиц использовалась ПЗС-камера Imrex B4820 с размером изображения 4904×3280 пикс (16 Мп) с возможностью

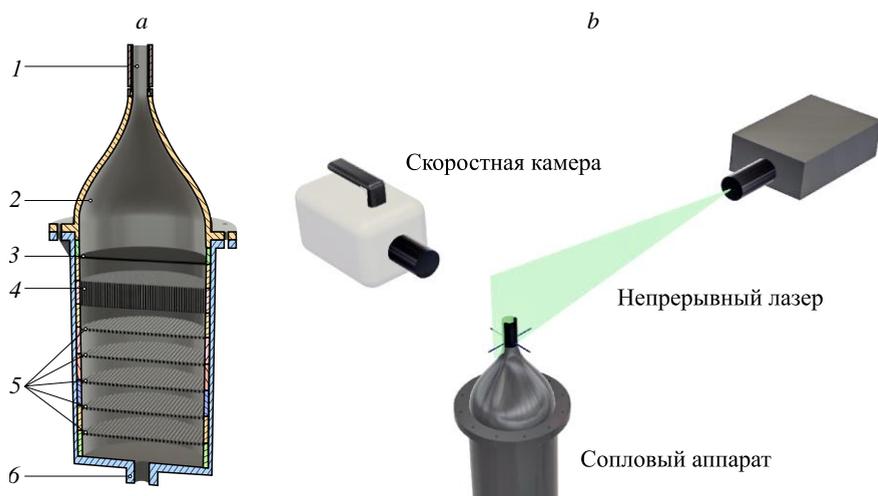


Рис. 1. Схема эксперимента.

a — разрез сопла: насадка (1), сопло (2), сетка (3), хонейкомб (4), система решеток (5), подвод воздуха (6); *b* — оптическая конфигурация PIV-системы.

записи кадров в двухкадровом режиме и объектив Sigma 105 мм. Камера и лазер были синхронизованы с помощью внешнего синхронизатора.

Для возмущения потока были выбраны две насадки круглого сечения внутренним диаметром $D = 20$ мм с реализацией соосного и поперечного вдува (рис. 2). В первом случае (рис. 2*a*) соосный вдув производился через четыре щели на торцевой кромке сопла толщиной 5 мм. Ширина каждой щели составляла 1 мм, расстояние между ними не превышало 1 мм. Во втором случае (рис. 2*b*) поперечный вдув производился внутри сопла через четыре отверстия диаметром 1 мм, поперек, на расстоянии 17 мм от кромки сопла. Для организации импульсного вдува был использован высокоскоростной клапан SMC SX11-AG мощностью 80 Вт и высокой частотой переключения до 1200 Гц. Клапан управлялся ПЛИС-контроллером через драйвер с функцией пониженного энергопотребления в режиме удержания в открытом состоянии для предотвращения перегрева соленоида клапана. Частота и скважность прямоугольного сигнала управления задавались программно. Непосредственно после клапана воздух разводился на четыре канала (по одному на каждую щель/отверстие).

Измерения были проведены для струи при числе Рейнольдса $Re = 5000$ в условиях без вдува и при пульсирующем вдуве в продольном и поперечном направлениях с частотой,



Рис. 2. Насадки с реализациями аксиального (*a*) и поперечного воздействия (*b*).

соответствующей числу Струхала $St = 0,5$. Средний расход через каналы вдува составлял 21 % от расхода струи. Коэффициент заполнения (отношение времени, когда клапан открыт, к периоду работы клапана) равен 50 %. Пространственное разрешение PIV-системы составляло 0,0218 мм/пикс. При расчете поля скорости адаптивным итерационным кросскорреляционным алгоритмом [7] конечный размер окна опроса составлял 16×16 пиксел с 50%-м пространственным перекрытием расчетных областей. Временная задержка между парой кадров — 30 мкс при частоте съемки в 1 Гц.

Результаты

Результаты скоростной визуализации для представленных режимов (рис. 3) показали явное изменение динамики потока при разных типах воздействия. Для режима без воздействия присутствует протяженный сдвиговый слой, в котором в результате развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца формируются кольцевые вихри, которые увеличиваются в размере вниз по потоку. В случае воздействия продольным вдувом видно, что поток турбулизируется значительно быстрее и в сдвиговом слое формируются тороидальные вихри меньшего размера. При поперечном вдуве поток струи практически сразу турбулизируется и течение струи связано с пульсирующим отклонением потока в поперечном направлении.

На рис. 4 представлены распределения продольной компоненты средней скорости (\bar{u}) для рассмотренных режимов течения. Без внешнего воздействия струя имеет протяженное ядро, которое значительно сокращается в случае продольного вдува. Более того, в таком случае также наблюдается значительное уширение слоя смешения струи, начиная с самой кромки сопла. В случае поперечного вдува струя имеет значительно больший угол раскрытия из-за интенсивного перемешивания с окружающим воздухом.

Для идентификации когерентных структур в полях пульсаций скорости на начальном участке струй был использован метод главных компонент (англ. Proper Orthogonal Decomposition, POD) разложения [0]. На рис. 5а показаны собственные значения разложений (λ_i), которые характеризуют осредненные по пространству значения кинетической энергии турбулентности, содержащейся в различных POD-модах. В случае без воздействия и при аксиальном вдуве наибольшая часть энергии соответствует двум первым

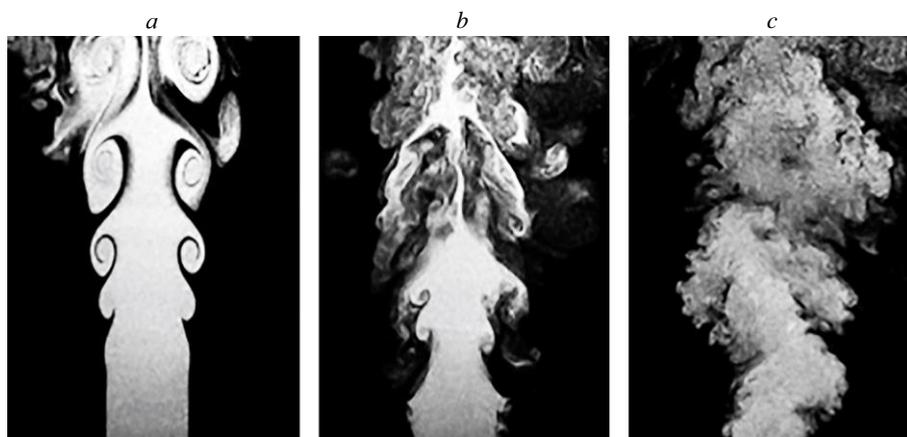


Рис. 3. Визуализация струи без внешнего воздействия (а), с соосным пульсирующим вдувом (b) и с поперечным вдувом (с).

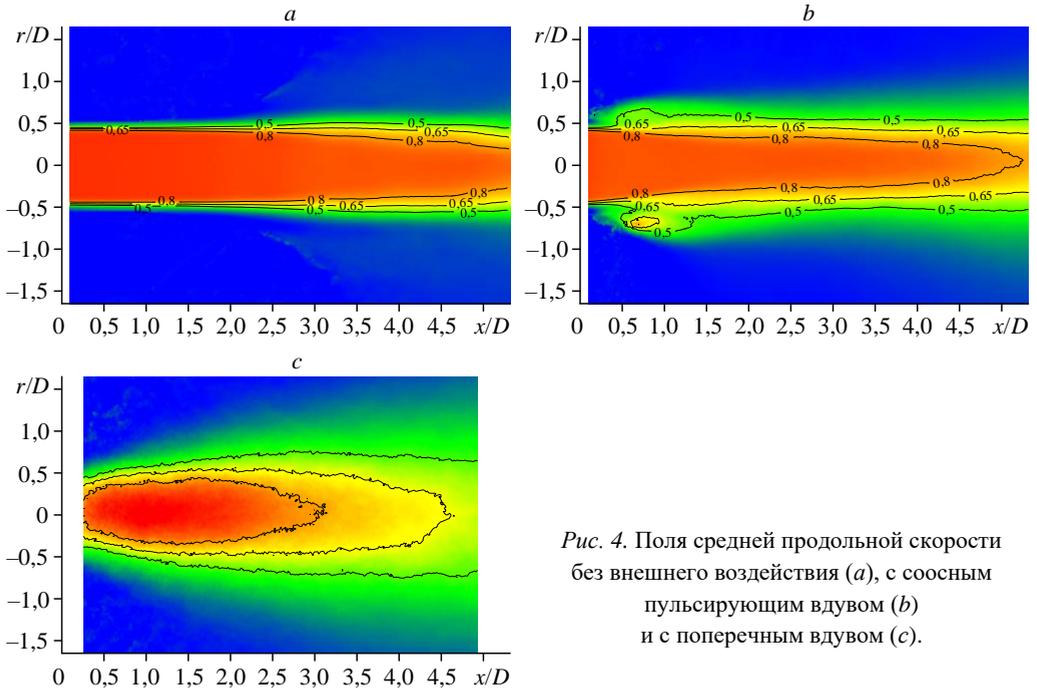


Рис. 4. Поля средней продольной скорости без внешнего воздействия (а), с соосным пульсирующим вдувом (b) и с поперечным вдувом (с).

модам (a_1 , a_2). Более того, для продольного вдува (см. рис. 5b) временные коэффициенты этих мод описывают кольцевую фигуру Лиссажу, соответствующую сдвигу фазы между первой и второй модами в 90° . Пространственные распределения первых двух мод $a_1(t_i)$, $a_2(t_i)$ показаны на рис. 6. В случае без управления и при продольном вдуве (см. рис. 6a, 6b) когерентные структуры соответствуют кольцевым вихрям, уносимым потоком. Также установлено, что при аксиальном пульсирующем вдуве парного объединения вихрей на начальном участке струи не возникает, в отличие от случая без воздействия. При поперечном пульсирующем вдуве (см. рис. 6с) наблюдалось быстрое разрушение ядра струи и нарушение периодической структуры течения.

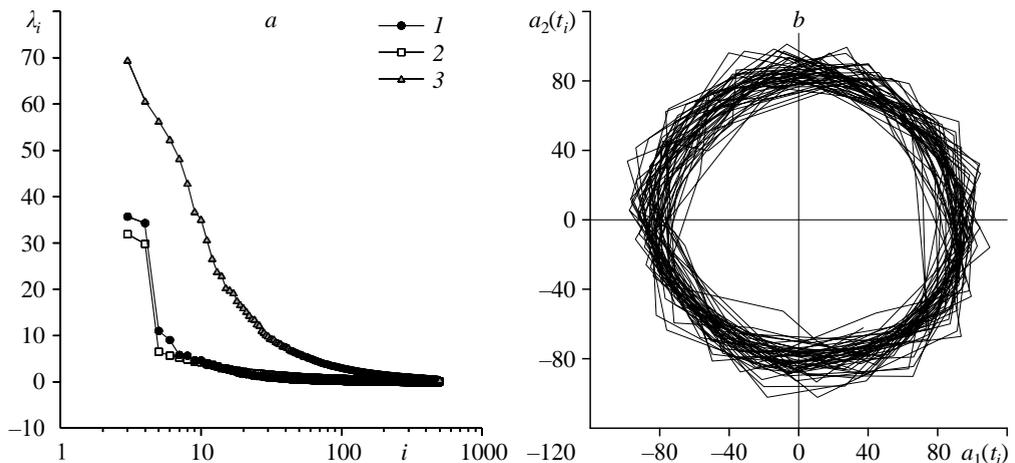


Рис. 5. Спектры собственных значений POD-разложения (а) и корреляция временных коэффициентов для продольного вдува (b). 1 — без возмущений, 2 — соосные возмущения, 3 — поперечные возмущения.

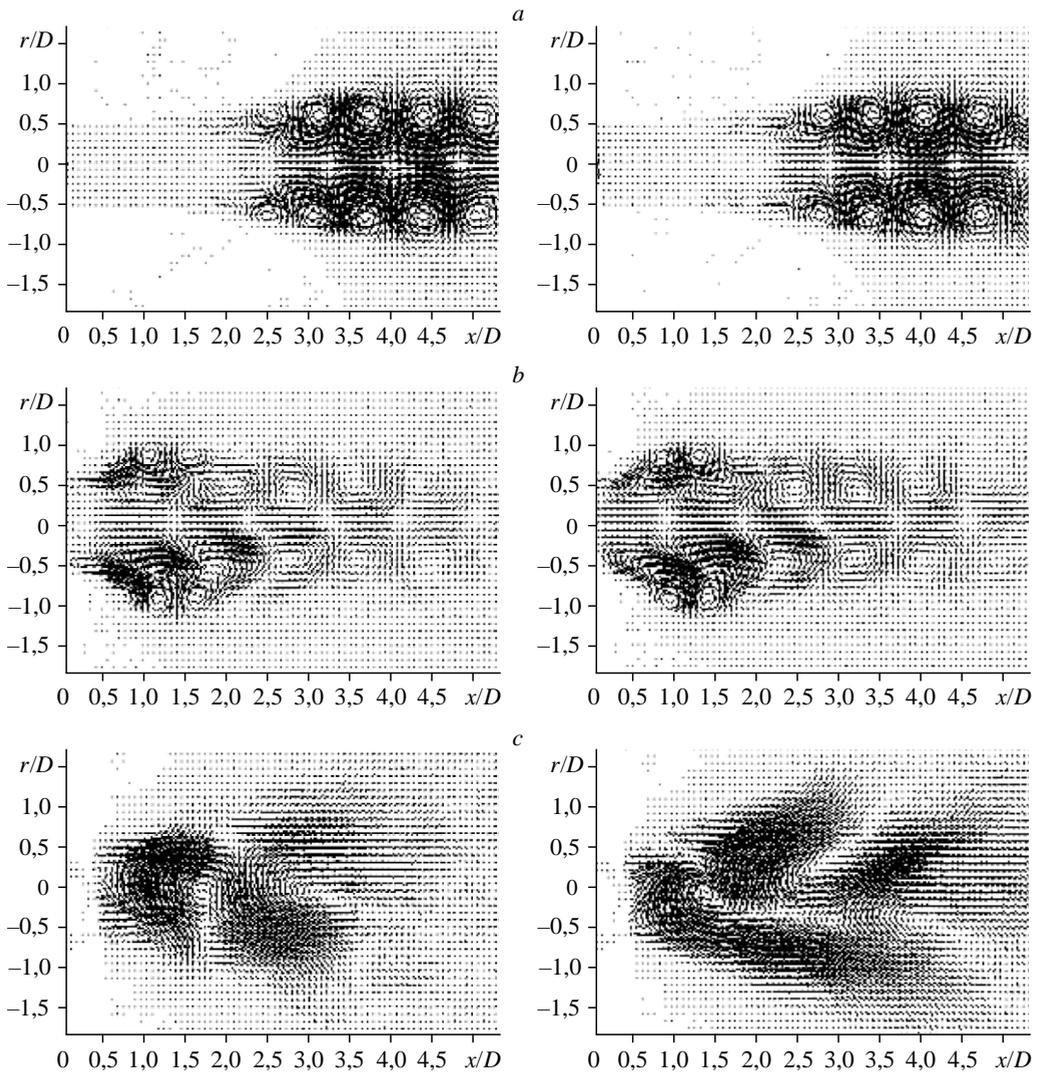


Рис. 6. Вид двух POD-мод струй без внешнего воздействия (а), с соосным пульсирующим вдувом (b) и с поперечным вдувом (с).

Слева — первая мода (a_1),
справа — вторая мода (a_2).

Заключение

В работе проведена визуализация основных режимов и PIV-диагностика для струйного турбулентного течения при $Re = 5000$ с соосными и поперечными периодическими возмущениями на частоте, соответствующей числу Струхала $St = 0,5$. Возмущения потока создавались быстродействующим электромагнитным клапаном с подачей воздуха в четыре сегмента, расположенных равномерно по азимутальной координате и организованные в сменных сопловых насадках. Анализ реализаций поля скорости показал интенсификацию смешивания струй с окружающим воздухом для соосных возмущений за счет генерации крупных тороидальных вихрей, а также существенную перестройку течения с быстрым разрушением ядра струи в случае возмущения в поперечном направлении.

Список литературы

1. **Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko, Y.A.** Round jet instability affected by initial conditions // Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities. Novosibirsk: Springer Cham, 2016. P. 35–42.
2. **Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К.** Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 240 с.
3. **Wu Z., Fan D., Zhou Y., Li R., Noack B.R.** Jet mixing optimization using machine learning control // *Experim. Fluids*. 2018. Vol. 59. P. 1–17.
4. **Zhou Y., Fan D., Zhang B., Li R., Noack B.R.** Artificial intelligence control of a turbulent jet // *J. Fluid Mech.* 2020. Vol. 897. P. A27–A73.
5. **Li R., Noack B.R., Cordier L., Borée J., Harambat F.** Drag reduction of a car model by linear genetic programming control // *Experim. Fluids*. 2017. Vol. 58. P. 1–20.
6. **Идельчик И.Е.** Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 352 с.
7. **Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Вычислит. технологии*. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
8. **Sirovich L.** Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part I: Coherent structures // *Quart. Appl. Math.* 1987. Vol. 45. P. 561–571.

*Статья поступила в редакцию ,
принята к публикации 8 ноября 2025 г.*