

УДК 532.525.2

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ЛАМИНАРНЫЕ МИКРОСТРУИ

© 2024 г. Ю. А. Литвиненко^{a,*}, А. А. Смяцких^a, М. В. Литвиненко^a

^aИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
*e-mail: litur@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 18.08.2024 г.

Принята к публикации 11.10.2024 г.

Представлены результаты исследований процесса формирования струи при взаимодействии двух соударяющихся осесимметричных ламинарных воздушных микроструй. Оси симметрии трубок лежат в одной плоскости и пересекаются под углом 60°. Расстояние между ближними концами трубок 4 мм. Истечение осуществлялось с равными скоростями. В результате эксперимента выявлены особенности формирования вторичной струи при естественных условиях и при воздействии внешнего периодического возмущения. Установлено, что результирующая струя формируется в ортогональной к трубкам плоскости. При естественных условиях вторичная струя формируется с большим более 115° углом раствора и представляет собой уплощённую струю. В случае внешнего воздействия периодическим акустическим сигналом после взаимодействия микроструй возникает незначительное уплощение с развитием вторичных колебаний в ортогональной плоскости с последующим поворотом к плоскости расположения трубок.

Ключевые слова: соударение воздушных микроструй, управление струйным течением, акустическое воздействие, ламинарные микроструи

DOI: 10.31857/S1024708424060094, **EDN:** FDUNZN

Понимание протекающих процессов и управление струйным смешиванием имеет фундаментальное и практическое значение во множестве технических приложений, таких как смешивание компонентов и газов, шумоподавление струйных течений, диффузионное горение, увеличение подъемной силы вторичными струями, теплопередача и химические реакторы. В тоже время развитие методов исследований и технологий производства приводит к активному освоению научно-технических процессов связанных с микромасштабами. Микротечения нашли свое применение в различных областях от производства микроэлектроники до тепломассобменных процессов. Например, жидкостные микропрессоры используют сталкивающиеся микроструи для формирования пелены, в которой происходит быстрое смешение и контакт компонентов с образованием продуктов реакции [1]. Столкновение газовых микроструй при определенных условиях также протекает с образованием области уплощения (пелены), которая в значительной мере определяет характер развития течения. Использование таких струй в процессах смешения и горения представляет большой интерес в связи с интенсификацией и стабилизацией процессов диффузионного горения, как было показано в [2]. Вышеупомянутая область представляет собой квазиплоскую вторичную струю большого удлинения. Создание такой струи напрямую из плоского сопла значительно увеличивает размеры генерирующей установки, а также снижает возможности по управлению структурой струи. Активное манипулирование струями имеет потенциал для достижения более гибких и значительных модификаций потока. Это большое преимущество перед пассивными, хотя зачастую и эффективными методами.

В качестве управляющего воздействия в данных исследованиях использовались внешние периодические акустические колебания. Механизм акустического управления развитием струйного течения достаточно широко использовался и ранее. Было предложено и исследовано множество активных методов, включая акустическое возбуждение [3–5], синтетические струйные приводы [6], сочетание осевого и окружного возбуждения на выходе из сопла для создания раздвоенных и расширяющихся

струй [7]. В данных же исследованиях акустическое воздействие осуществляется на сами сталкивающиеся микроструи. Предполагается, что воздействие на частоте собственных колебаний приведет к трансформации структуры течения в области взаимодействия струй.

Развитие струйных течений связано с возникновением различных типов гидродинамической неустойчивости. Струи, сформированные в каналах малого удлинения, способствуют развитию в них неустойчивости Кельвина–Гельмгольца варикозного или синусоидального типа с ранней турбулизацией. Для струй, сформированных каналами с большим удлинением, такая неустойчивость не реализуется, и струя имеет протяженный ламинарный участок [8]. Данные особенности проявляются и при реализации соударяющихся струй.

Целью данной работы явилось определение основных характеристик течения в области взаимодействия двух сталкивающихся ламинарных микроструй, истекающих в затопленное воздушное пространство при естественных условиях и при воздействии внешнего периодического акустического сигнала.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА

Все экспериментальные исследования проводились в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН на струйной установке. Установка состояла из двух идентичных цилиндрических трубок длиной 40 мм и внутренним диаметром 0.6 мм, расположенных под углом 60° между осями симметрии сопел. Расстояние между срезами сопел 4 мм. Схема установки представлена на рис.1. Сжатый воздух подавался из баллона на регулятор массового расхода MKS MASS FLOW, после чего разделялся тройником на две трассы подводящие газ к микросоплам. Управление регулятором массового расхода осуществлялось через двухканальный модуль MKS PR4000B. Расход воздуха контролировался с точностью $\pm 0.7\%$. Перед регулятором массового расхода создавалось избыточное давление 6 атм. Истечение осуществлялось в воздушное пространство при 20 °C и атмосферном давлении. Расход воздуха через каждое сопло соответствовал 1/2 устанавливаемого расхода на регуляторе и был равен $5.2 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$. Учитывая диаметр сопла 600 мкм, расчетная скорость газа,

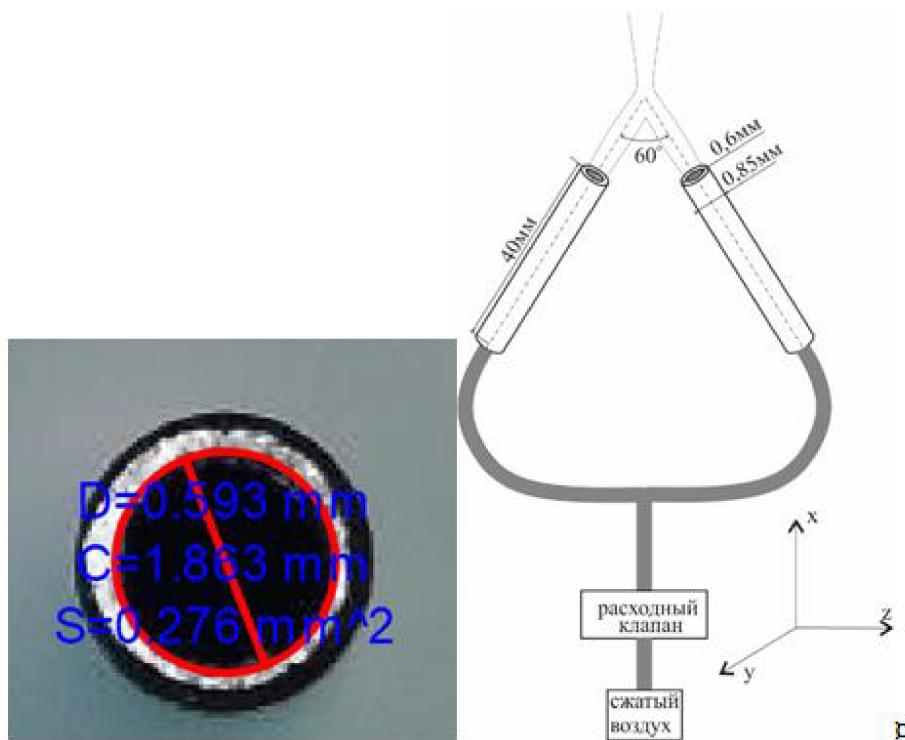


Рис. 1. Схема струйной установки. Фото торца трубы. Диаметр трубы: внешний — 0.85 мм, внутренний — 0.6 мм, длина трубок — 40 мм.

истекающего через каждое сопло, $U_1 = U_2 = 10$ м/с, что соответствовало числу $Re = 400$, вычисленному по диаметру сопла. Измерения выполнялись с использованием термоанемометрического метода. В ходе измерений регистрировалась продольная к плоскости симметрии двух струй компонента скорости — $U(t)$ с частотой дискретизации 10 кГц. По полученным данным вычислялось стандартное отклонение пульсаций скорости $u' = \sqrt{\sum (U_i - \bar{U})^2 / i}$. Волластоновая нить датчика с диаметром проволоки 5 мкм и длиной 0.4 мм использовалась при коэффициенте перегрева 1:8. Калибровка датчика для всех экспериментальных исследований производилась в потенциальном течении круглой струи, для чего была изготовлена отдельная установка. Непосредственно перед измерением датчик перемещался координатным устройством к соплу установки, после тарировки возвращался на место измерений. Погрешность тарировочной кривой составляла менее 0.5% для всех точек в измерительном диапазоне. Автоматизированное координатное устройство для перемещения датчика термоанемометра управлялось компьютером и позволяло проводить длительные экспериментальные съемки по заранее заданной трехмерной геометрической сетке точек измерения. В данных экспериментах измерялась область размерами $(x \times y \times z) = 20 \times 20 \times 10$ мм соответственно, время считывания данных в каждой из точек 0.5 с, частота 10000 точек/с. Для повышения точности позиционирования на каждом из трех линейных модулей перемещения устанавливались магнитные линейки, поддерживающие точность до 5 мкм в абсолютной системе координат. Сигнал с термоанемометра подавался на 12-разрядный аналогово-цифровой преобразователь National Instruments NI-6023E, установленный на материнской плате компьютера. Коммутация термоанемометра и АЦП осуществлялась через вспомогательный соединительный модуль BNC-2120. Данные эксперимента сохранялись на жестком диске компьютера и обрабатывались в программной среде MatLab.

Для детального изучения процесса взаимодействия и возможности управления развитием двух сталкивающихся микроструйных течений использовались преимущества контролируемого эксперимента с введением контролируемых возмущений. Периодические во времени возмущения возбуждались динамиком, расположенным в плоскости трубок на расстоянии порядка 300 мм от области пересечения струй. Диффузор динамика был ориентирован также на область пересечения струй. Сигнал для динамика контролируемой частоты и амплитуды генерировался платой аналогового выхода компьютера и внешним усилителем. Частота искусственных возмущений составляла 1500 Гц с интенсивностью до 97 дБ на оси симметрии динамика, и была выбрана по результатам предварительных измерений естественного спектра течения. Измерения проводились с синхронизацией фазы акустического сигнала по выбранному фронту возмущения и момента начала записи осциллограммы скорости. После проведения процедуры тарировки, в программу сбора данных вносились указания по каждой из трех координатных осей, величине шага и количестве шагов, длительности сбора данных и т.д., после чего процесс измерения происходил в автоматическом режиме. Как уже упоминалось целью исследований являлась именно область взаимодействия двух микроструй, но не начальный участок вблизи среза сопел, тем более что исследование этой области вызывает определенные сложности, вызванные малым диаметром микротрубок и положением нити датчика относительно направления струйного течения. Но поскольку начальные условия в виде профиля скорости, несомненно, играют важную роль, были выполнены расчеты течения в ANSYS Fluent в трехмерной постановке для микротрубки с такими же как в эксперименте геометрическими размерами. Расчеты выполнены с использованием модели ламинарного течения. На входе в трубку задавалась равная по всему сечению трубки скорость $U_{\text{нач}} = 6$ м/с, на стенке трубки ставилось условие прилипания, на выходе — outflow.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлен рассчитанный профиль скорости, реализующийся на срезе сопла. На выходе из микротрубки длиной 40 мм профиль скорости трансформировался к параболическому с максимальным значением скорости на выходе из трубы $U_{\text{max}} = 10.8$ м/с, отношение $U_{\text{max}}/U_{\text{нач}} = 1.8$ соответствует практически развитому ламинарному течению Пуазеля при $Re = (U_{\text{нач}} \cdot d)/v = 430$. Учитывая полученные расчетные данные в экспериментальных исследованиях, устанавливалась также скорость на выходе из каждого микроканала.

Как упоминалось выше, измерения производились в границах трехмерной области, по продольной координате x и вертикальной y — 41 точка, по поперечной z — 21 точка, всего 35301 точка измерений с равным для всех направлений шагом 0.5 мм. Отсчет продольной координаты x проводился с отступом порядка 1.5 мм от средней линии среза сопел. Изменения максимальных значений продольной

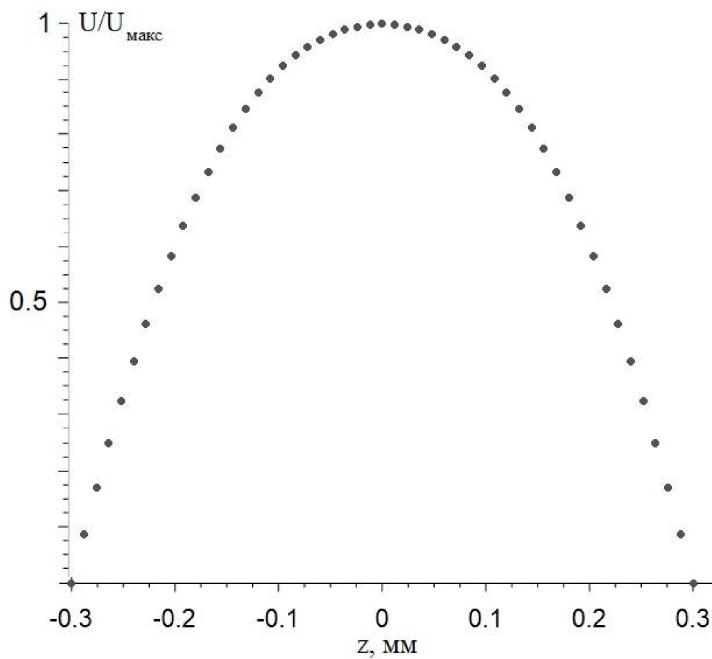


Рис. 2. Рассчитанный в AnsysFluent профиль скорости на выходе из микротрубки.

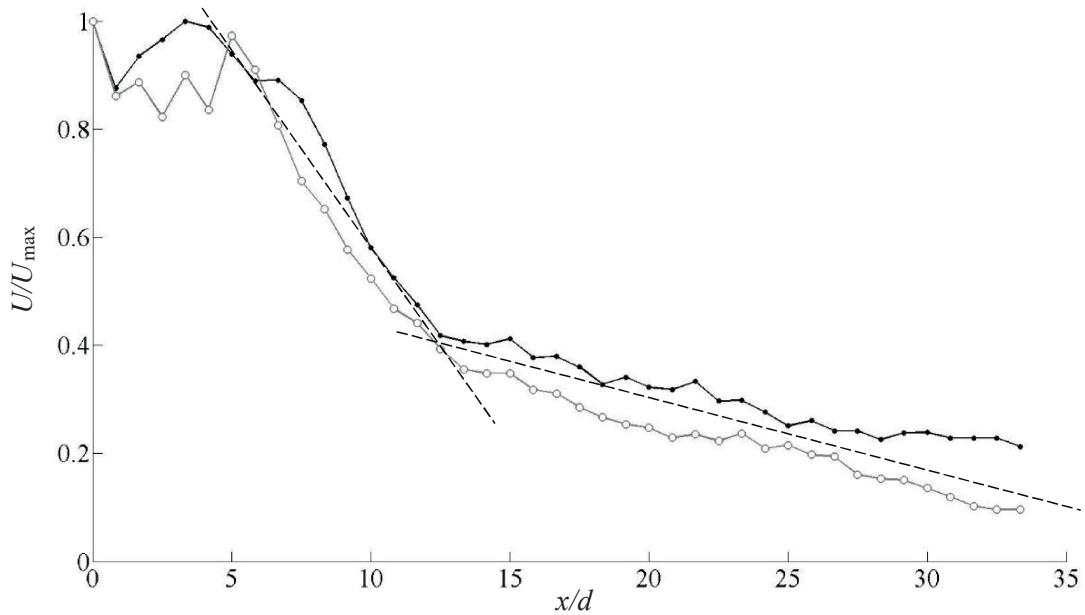


Рис. 3. Изменение максимальной скорости по продольной координате: о – естественный случай; • – 1500 Гц.

компоненты скорости U/U_{\max} , полученных в каждом поперечном сечении уз в зависимости от продольной координаты обезразмеренной на диаметр выходного отверстия микротрубки x/d представлен на рис. 3. Данные свидетельствуют о незначительном отличии продольной скорости для случая естественного истечения и при воздействии внешних акустических колебаний. Начиная с $x/d = 5$, наблюдается область значительного линейного падения продольной скорости, показанная пунктирной линией, далее с $x/d = 12$ происходит излом, и дальнейшее снижение скорости замедляется также близко к линейному закону. Область значительного падения скорости соответствует области взаимодействия двух микроструй и развитию вторичной (результирующей) струи. На рис. 4. представлены максимальные значения пульсаций скорости от безразмерного расстояния x/d . Для естественных условий флуктуации скорости возрастают незначительно с 0.5% U_{\max} до 3% U_{\max} . При воздействии внешнего аку-

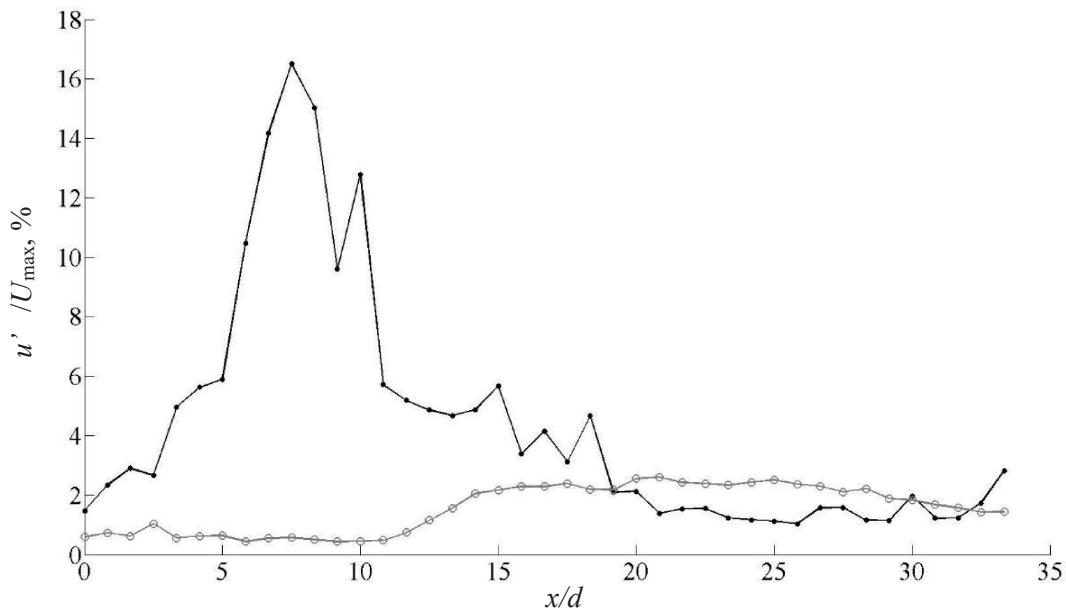


Рис. 4. Распределение максимальных значений среднеквадратичных пульсаций по продольной координате: \circ – естественный случай; \bullet – 1500 Гц.

стического возмущения отмечается резкий рост пульсаций с $1\% U_{max}$ до $17\% U_{max}$. Следует отметить, что области роста флюктуаций для микроструй сталкивающихся при естественных условиях и при воздействии возмущения локализованы в разных областях. В случае акустического воздействия, максимальный рост пульсаций приходится на начало области столкновения микроструй, а в естественном случае на центральную область образовавшейся квазиплоской струи. Необходимо отметить, что результирующие струи для двух случаев значительно отличаются, как по структуре течения, так и по характерным размерам.

На рис. 5. представлены изоповерхности отклонения мгновенной скорости от осредненной по времени скорости для сталкивающихся микроструй при естественных условиях – 1, при внешнем акустическом воздействии с частотой 1500 Гц – 2. Амплитуда изоповерхностей составляла $a - g$ $1\% U_{max}$, $2\% U_{max}$, $3\% U_{max}$ и $4\% U_{max}$. Превышение средней скорости показано светлым полутоном, дефект средней скорости показан темным полутоном. В естественном случае после точки столкновения микроструй формируется область превышения скорости в виде квазиплоской структуры большого поперечного размера, при этом структура расположена ортогонально по отношению к плоскости расположения микротрубок. Более скоростные отклонения концентрируются по оси симметрии микротрубок. Ниже по течению продольная составляющая скорости значительно снижается, течение турбулизуется. В случае акустического воздействия с частотой 1500 Гц, развитие неустойчивости протекает по другому сценарию. Ниже области столкновения при всех амплитудах отклонения от средней скорости в ортогональной плоскости образуется незначительная область уплощения, превышающая осредненные по времени значения скорости. При столкновении микроструй при естественных условиях поперечный размер результирующей струи по меньшей мере в 2 раза больше чем в случае с акустическим воздействием. При этом, в случае с акустическим воздействием, высокоскоростная область с ортогональным уплощением перестраивается второй раз, возвращаясь к начальной плоскости истечения микроструй, как показано светлыми полутонами.

На рис. 6 представлены изоповерхности стандартного отклонения пульсаций скорости для уровней пульсаций $1\% U_{max}$, $2.2\% U_{max}$, $3\% U_{max}$ для естественного случая, и $0.4\% U_{max}$, $0.89\% U_{max}$, $2.7\% U_{max}$ при акустическом воздействии. Анализ полученных данных показал, что пространственное положение повышенного уровня флюктуаций скорости совпадает с локализацией областей превышения скорости представленных на рис. 5. В целом изоповерхности пульсаций скорости также демонстрируют отличия в развитии естественного случая столкновения двух микроструй и случая с акустическим воздействием. Для первого характерна большая поперечная область сосредоточения пульсаций, для второго пульсации локализованы в гораздо меньшей области, отличия в объеме областей для сопоста-

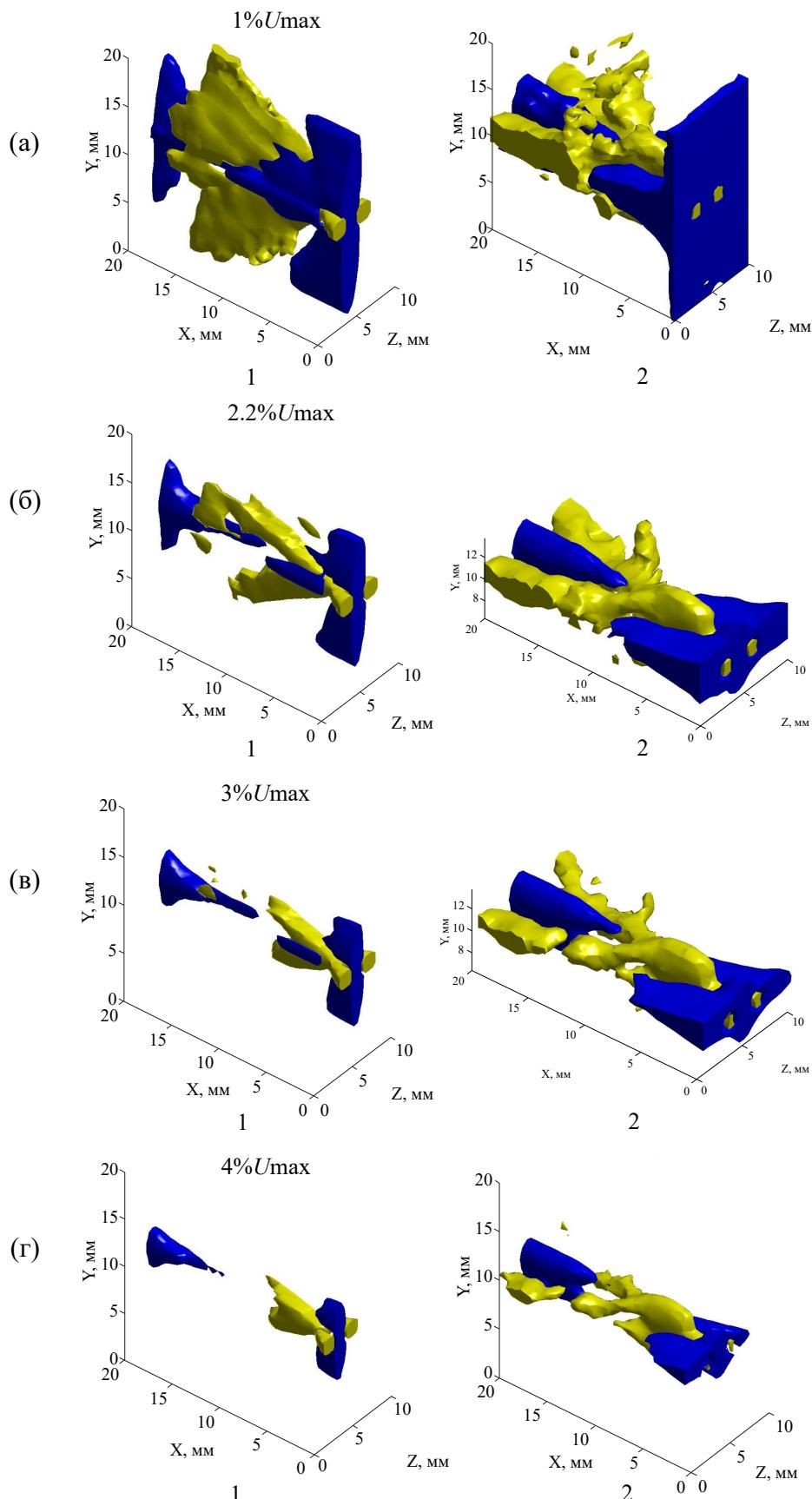


Рис. 5. Изоповерхности отклонения мгновенной скорости от средней скорости: (а) – $1\% U_{\max}$; (б) – $2.2\% U_{\max}$; (в) – $3\% U_{\max}$; (г) – $4\% U_{\max}$; 1 – естественный случай, 2 – 1500 Гц; светлое – превышение средней скорости, темное – дефект средней скорости.

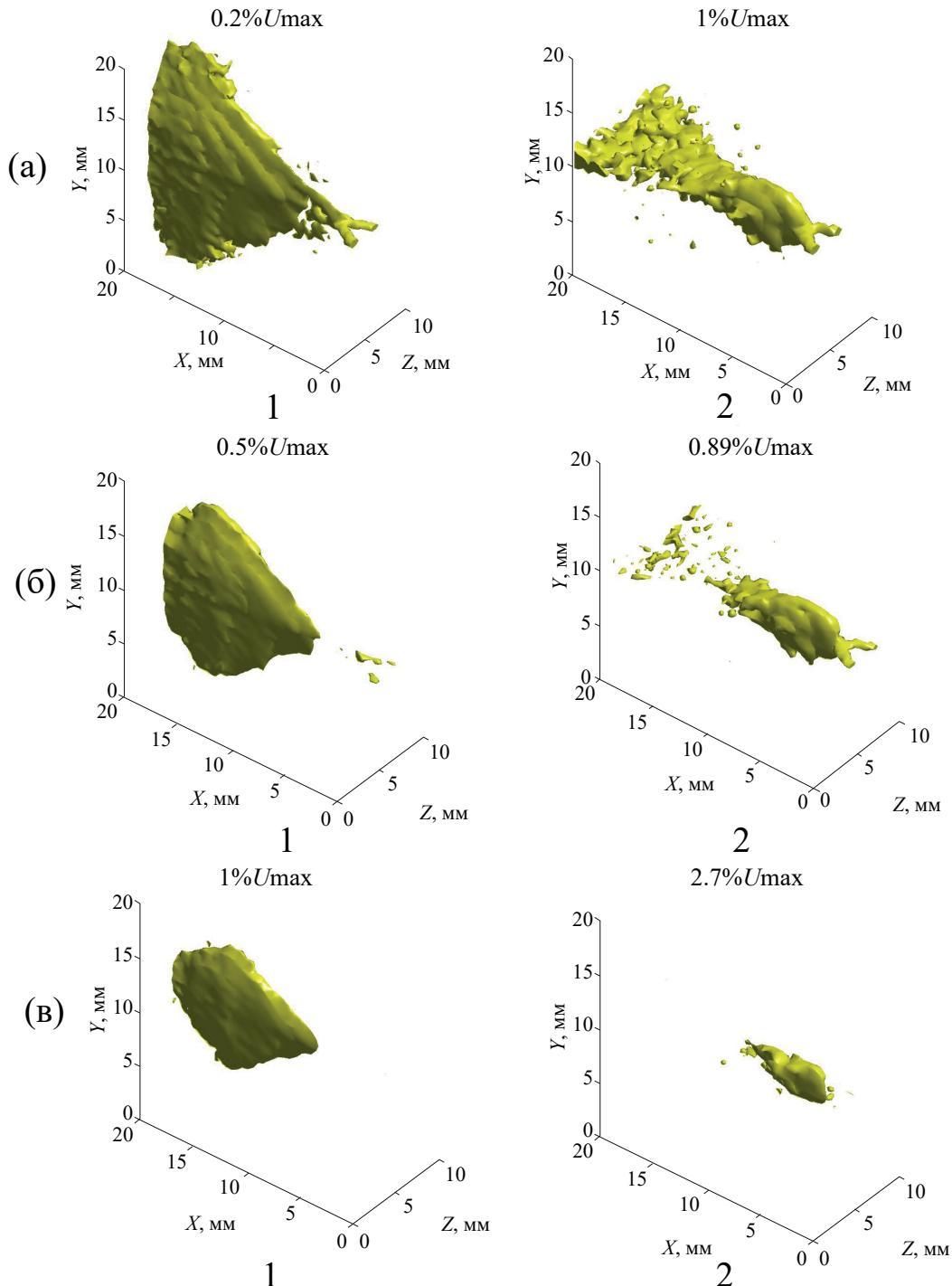


Рис. 6. Изоповерхность стандартного отклонения пульсаций продольной компоненты скорости. 1 – естественный случай: (а) – 0.2% U_{\max} ; (б) – 0.5% U_{\max} ; (в) – 1% U_{\max} ; 2 – 1500 Гц; (а) – 0.4% U_{\max} ; (б) – 0.89% U_{\max} ; (в) – 2.7% U_{\max} .

вимых амплитуд возмущений более чем в 2 раза. В случае с акустическим возмущением рис. 6б имеет место развитие вторичного колебания, развивающегося с ортогональной области уплощения (в плоскости xy) и переходящего далее в плоскость zx . Данный факт подтверждается гармоническим колебанием областей равной скорости на рис. 7а, где представлены три графика с шагом 1×10^{-4} с по времени. Частота вторичных колебаний соответствует частоте акустического воздействия. На рис. 7б–г представлены амплитудные спектры пульсаций скорости при воздействии акустического возмущения $f = 1500$ Гц, (б) – точка находится в струе вблизи среза микрострушки, (в) – точка находится

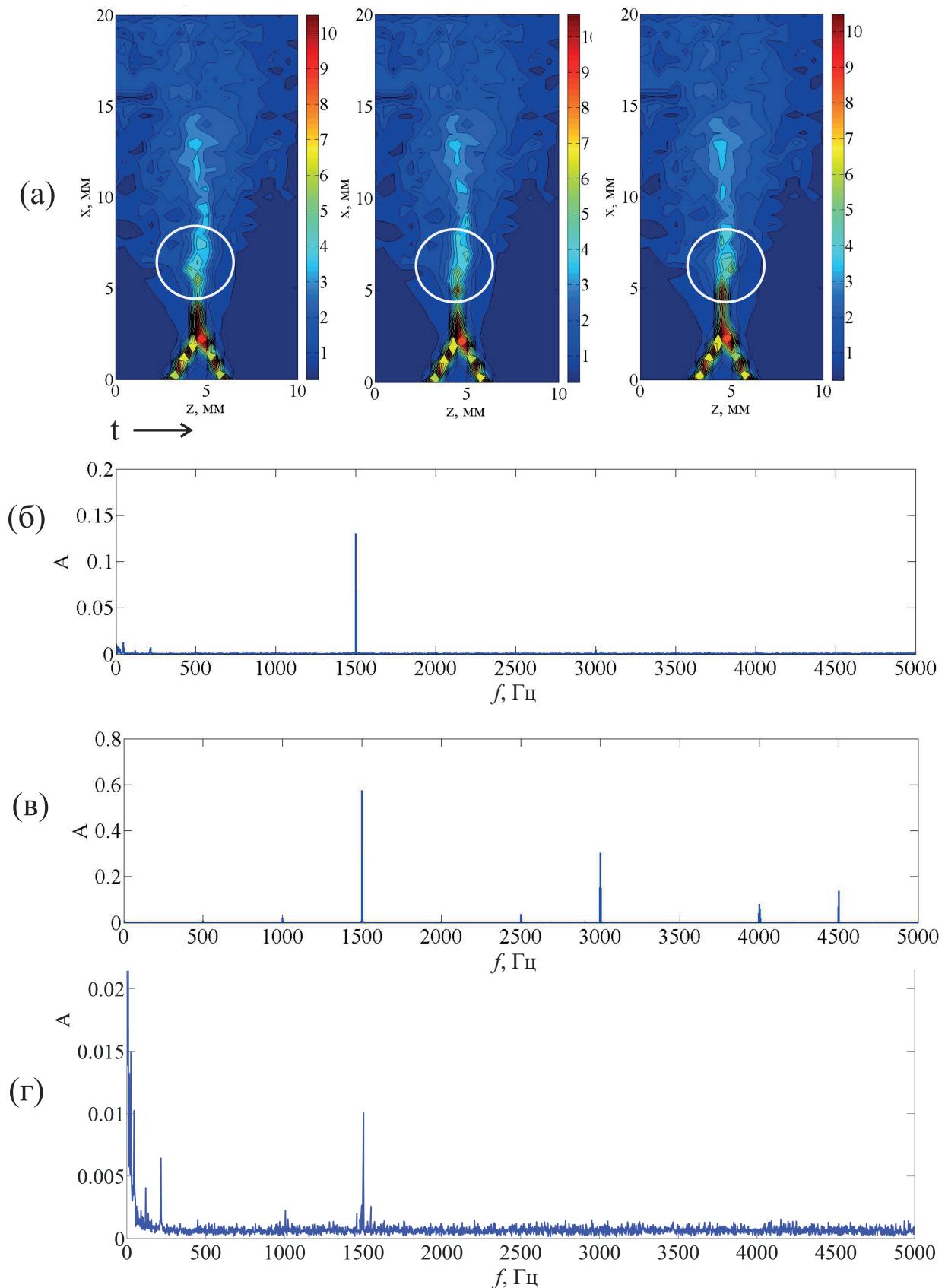


Рис. 7. (а) — Распределение изолиний равной скорости в плоскости xz , $y = 10.5$ мм. Шаг по времени 1×10^{-4} с. Амплитудные спектры пульсаций скорости в точке (б) — $x = 0.5$, $z = 6$ мм, (в) — $x = 6$, $z = 4.5$ мм — при акустическом воздействии $f = 1500$ Гц; (г) — область столкновения — естественный случай.

в области столкновения микроструй, (г) – область столкновения микроструй без воздействия. Установлено, что в амплитудном спектре пульсаций скорости при естественном истечении сталкивающихся микроструй как обычно заполнена низкочастотная часть спектра, а также существует локальный максимум амплитуды на частоте 1500 Гц (рис. 6в), данная частота является собственной частотой естественного возмущения. При воздействии акустического возмущения с частотой 1500 Гц в области до взаимодействия микроструй (рис. 7б) в спектре выделяется одна несущая частота, соответствующая частоте акустического воздействия, в спектре, полученном в области взаимодействия микроструй (рис. 7в), отмечается значительный рост амплитуды пульсаций с появлением двух гармоник.

Сравнивая два исследованных случая развития сталкивающихся микроструй, можно утверждать, что влияние акустического возмущения существенно меняет структуру струйного течения. Использование таких струй при контролируемых возмущениях в процессах диффузионного струйного горения может способствовать более качественному смешению компонентов или формированию определенного вида факела. Кроме того, учитывая значительное увеличение площади квазиплоской струи в естественном случае, такая структура может использоваться как преграда для разрушения более масштабных структур, например, располагаясь на срезе сопла разрушать осесимметричные вихри.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований взаимодействия воздушных микроструй при внешнем акустическом воздействии были получены следующие результаты. Получены сценарии развития результирующей струи при столкновении двух воздушных микроструй в естественных условиях и в условиях внешнего акустического воздействия. Установлена возможность управления развитием струйного течения акустическим воздействием.

В результате взаимодействия двух микроструй, в естественном случае, реализуется квазиплоская результирующая струя большой относительной ширины. При акустическом воздействии ширина значительно уменьшается. Также меняется структура течения, происходит повторный разворот уплощенной области (превышение средней скорости) к плоскости расположения микротрубок.

Акустическое воздействие способствует развитию вторичного колебания развивающегося в области уплощения с частотой акустического возбуждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00151, <https://rscf.ru/project/22-19-00151/>)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абиев Р.Ш., Альмяшева О.В., Гусаров В.В., Изотова С.Г. Способ получения нанопорошков феррита кобальта и микрореактор для его реализации // Патент на изобретение № RU 2625981 2017. С1. 20.07.2017
2. Kozlov V.V., Litvinenko Y.A., Katasonov M.M. et al Distinctive Features of Plume Formation on Collision of Two Laminar Gas Jets // Fluid. Dyn. 2023. V 58. № 4. P. 634–639. <https://doi.org/10.1134/S0015462823700076>
3. Cohen J., Wygnanski I. The evolution of instabilities in the axisymmetric jet // J. Fluid. Mech. 1987. V. 176. P. 191–219.
4. Ginevsky A. S., Vlasov Y. V., Karavosov R. K. Acoustic Control of Turbulent Jets // Springer. 2004. 235 p.
5. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of Conventional and Combusting Subsonic Jet Instabilities // Dordrecht: Springer International Publishing. 2016. 126p. (Springer Briefs in Applied Sciences and Technology).
6. Smith B.L., Glezer A. Jet vectoring using synthetic jets // J. Fluid. Mech. 2002. V. 458. P. 1–34.
7. Reynolds W.C., Parekh D.E., Juvet P.J.D., Lee M.J.D. Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. V. 35. P. 295–315.
8. Гrek Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение // Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 240 с.

EFFECT OF ACOUSTIC EXCITATION ON COLLIDING LAMINAR MICROJETS

Yu. A. Litvinenko^{a,*}, A. A. Smyatskikh^a, and M. V. Litvinenko^a

^a*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

*e-mail: litur@itam.nsc.ru

Abstract—The results of studies of the jet formation process during the interaction of two colliding axisymmetric laminar air microjets. The axes of symmetry of the tubes lie in the same plane and intersect at an angle of 60°. The distance between the near ends of the tubes is equal to 4 mm. The outflow with identical velocities was implemented. As a result of the experiment, the distinctive features of the secondary jet formation under natural conditions and under the impact of an external periodic disturbance were revealed. It was found that the resulting jet is formed in the plane orthogonal to the tubes. Under natural conditions, a secondary jet with a beam angle greater than 115° is formed and represents a flattened jet. In the case of the external impact by a periodic acoustic signal, after the interaction of the microjets, a slight flattening appears with the development of secondary oscillations in the orthogonal plane and subsequent rotation with respect to the plane of the tubes.

Keywords: air microjets collision, jet flow control, acoustic excitation, laminar microjets