

УДК 532.526

ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ ПЛОСКОЙ ПРИСТЕННОЙ СТРУИ*

**В.Г. ЧЕРНОРАЙ, М.В. ЛИТВИНЕНКО, Ю.А. ЛИТВИНЕНКО, В.В. КОЗЛОВ,
Е.Е. ЧЕРЕДНИЧЕНКО**

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Изучается поле течения плоской пристенной струи вблизи сопла. Течение, организованное в таком виде, может быть разделено на две области. В непосредственной близости к поверхности расположена область пограничного слоя, выше нее — область свободного сдвигового слоя. Для обоих слоев характерно присутствие продольных когерентных структур, наличие которых подтверждают данные дымовой визуализации и термоанемометрических измерений. Структуры, развивающиеся в различных областях, имеют разные поперечные масштабы и появляются на разном расстоянии от сопла. Исследовано влияние скорости потока на развитие продольных структур, взаимодействие продольных возмущений, развивающихся в пограничном слое и слое сдвига, возбуждаемых акустическим полем. Для измерений сложного трехмерного течения использовался термоанемометр вместе с высокоточным автоматизированным координатным устройством и системой триггерования и сбора данных. В разных сериях эксперимента область измерений (X , Y , Z) варьировалась от 3000 до 25000 точек. Удалось установить следующее. Уровень скорости потока на выходе из сопла и частота образования колец Кельвина–Гельмгольца имеют непосредственное влияние на размер структур. Например, повышение скорости и частоты ведет к уменьшению поперечного размера продольных структур.

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентная пристенная струя представляет собой поток, истекающий через сопло и развивающийся вблизи поверхности. Данные течения имеют большую практическую ценность и встречаются в различных областях техники. Например, в пленочном охлаждении лопаток в турбинах двигателей, камерах сгорания, системах антиобледенения автомобилей и самолетов. Пристенные струи могут рассматриваться как двухслойные течения, состоящие из внутреннего слоя, начинающегося от пограничного слоя до точки максимальной скорости потока, и внешнего свободного сдвигового слоя, расположенного выше точки максимума скорости. Внутренний и внешний слои активно взаимодействуют, формируя сложное трехмерное течение.

Во внешнем поле пристенной струи, свободном сдвиговом слое, в профиле средней скорости присутствует точка перегиба, поэтому можно говорить о присутствии невязкой неустойчивости. В свободном слое сдвига двумерные вихри неустойчивости Кельвина–Гельмгольца являются определяющими. Развитие двумерного движения [1] часто сопровождается вторичными продольными когерентными структурами, которые появляются из неустойчивости исходных вихрей. Экспериментально было установлено, например, в работе [2], [3], что положение перехода

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № РНП. 2.1.2.3370) и РФФИ (грант № 05-01-00034).

от двумерного течения к трехмерному зависит от интенсивности возмущений. Также было установлено, что продольные вихри объединяются в жгуты [4] между двумерными вихрями, и затем они проникают в ядра вихрей. Авторы работы [4] отметили значимость продольной завихренности в процессах смешения и формировании внешних структур потока в ближнем поле круглой струи. Результаты экспериментальных исследований свободного сдвигового течения подтверждаются численными работами ([5], [6]). В одной из последних [7] утверждается, что трехмерная неустойчивость потока присутствует и в свободных сдвиговых слоях. При высоких амплитудах возмущений неустойчивость потока приводит к развитию вращающихся в противоположных направлениях продольных вихрей, формирующих жгуты между поперечными двумерными волнами.

Примечателен тот факт, что в свободных сдвиговых течениях наблюдаются трехмерные мелкомасштабные структуры, и они не обязательно разрушают вышеупомянутые крупномасштабные двумерные. В то же время численные методы исследования сдвиговых слоев, развивающихся возле стенки, показывают противоположный результат, который сводится к тому, что трехмерные эффекты играют главенствующую роль в процессе разрушения структуры течения и переходе к турбулентности. Учитывая данные особенности, пристенная струя представляется особым случаем, интересным для изучения как смесь свободного сдвигового и граничащего со стенкой течений, в которых происходит взаимодействие между дву- и трехмерными структурами.

Следует отметить, что имеется малое количество опубликованных работ, посвященных трехмерным процессам ламинарно-турбулентного перехода в приложении к пристенным течениям. Часто встречаются экспериментальные исследования пристенных течений, выполненные на выпуклой или вогнутой поверхности, в которых наблюдается возникновение продольных структур. Процессы течения на вогнутой поверхности исследовались в работе [8], позже авторы [9] выполнили визуализацию течения и термоанемометрические измерения, которые доказывают существование крупных продольных вихрей. Этот факт позволяет предположить, что вихри, образующиеся на кривой поверхности, в данном случае связаны с центробежной неустойчивостью.

В представленных экспериментах продольные вихри в пристенной струе, развивающейся над плоской поверхностью, изучаются только с точки зрения взаимодействия между дву- и трехмерными структурами. Исследуется влияние параметров, таких как скорость потока, акустические возмущения, на развитие и изменение характеристик продольных возмущений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты проводились на установке плоской пристенной струи в Чалмерском технологическом университете (Гетеборг, Швеция), которая показана на рис. 1. Пристенная струя формировалась на выходе потока из двумерного сопла и развивалась вдоль горизонтальной плоской пластины длиной 2,1 м, шириной 3,2 м. Высота сопла составляла 11 мм, ширина — 500 мм. Используемая система координат изображена на рис. 1, ось x имеет продольное относительно потока направление, ось y — нормальное к стенке и ось z — поперечное к потоку направление. Установка оснащена вертикальной стенкой высотой 1,2 м, расположенной над соплом, и боковыми стенками такой же высоты, что позволяло проводить эксперимент в неподвижной окружающей среде.

Исследования велись при помощи дымовой визуализации и “термоанемометрической визуализации” с измерением мгновенной скорости. Воздух нагнетался вентилятором в форкамеру, в которой были установлены перфорированная пластина,

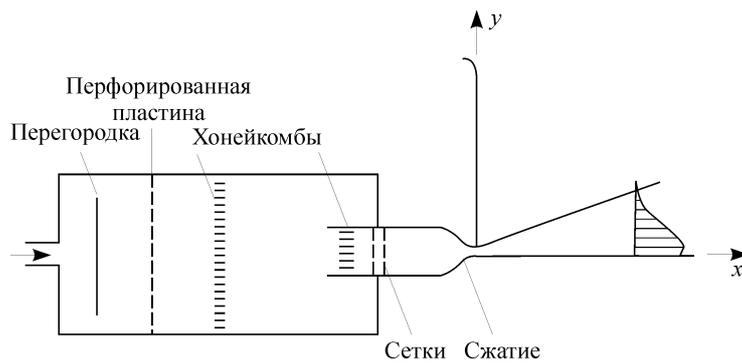


Рис. 1. Схема пристенной струи.

2 хонейкомба и сетки. После этого поток направлялся в двумерное сопло с коэффициентом поджатия 36:1. Уровень турбулентности, измеренный на выходе из сопла в частотном диапазоне от 10 Гц до 10 кГц, составлял менее чем 0,05 %. В процессе измерений скорость U_0 контролировалась трубкой Пито–Прандтля, расположенной в ядре струи.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Продольная компонента скорости измерялась термоанемометром постоянной температуры фирмы DANTEC. Использовался одноточечный датчик с чувствительным элементом в виде нити из позолоченного вольфрама диаметром 5 мкм и длиной 1 мм с коэффициентом перегрева 1,8. Калибровка датчика проводилась на срезе сопла с помощью трубки Пито–Прандтля. Использовался электронный микроанометр FSO510, который оснащен датчиками для измерения температуры и полного давления. Калибровочная функция определялась как

$$U = k_1(E^2 - E_0^2)^{1/n} + k_2(E - E_0)^{1/2},$$

где E и E_0 — выходные напряжения с анемометра при скорости U и при нулевой скорости потока соответственно, k_1 , k_2 и n — константы, определяемые эмпирически. Ошибка калибровки не превышала 0,5 % для всех точек в интервале изучаемых скоростей.

Для выполнения измерений в струе использовался дистанционно управляемый координатник, который позволял в автоматическом режиме перемещать датчик в трех направлениях: вниз по потоку (x) с точностью 0,01 мм, в поперечном направлении (z) с точностью 0,01 мм, по нормали к поверхности (y) с точностью 0,005 мм.

Двумерные волны в потоке пристенной струи возбуждались при помощи динамического громкоговорителя, помещенного в двух метрах от сопла. Для генерации возмущений синусоидального типа с контролируемой частотой и амплитудой использовался цифровой генератор, управляемый через компьютер. Задымление потока для проведения визуализации осуществлялось дымовым генератором, затем дым подавался в форкамеру при помощи вентилятора. В качестве визуализирующего устройства использовался световой нож, который позволял получать картины с сечением струи в двух направлениях: параллельно и перпендикулярно потоку.

БЛИЖНЕЕ ПОЛЕ ПРИСТЕННОЙ СТРУИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В ближнем поле пристенной струи потока было установлено местоположение продольных структур и их характерные размеры. На рис. 2 показан кадр из визуализации структур потока (1–2 мкс) при числе Рейнольдса $0,5 \cdot 10^4$. Световой нож

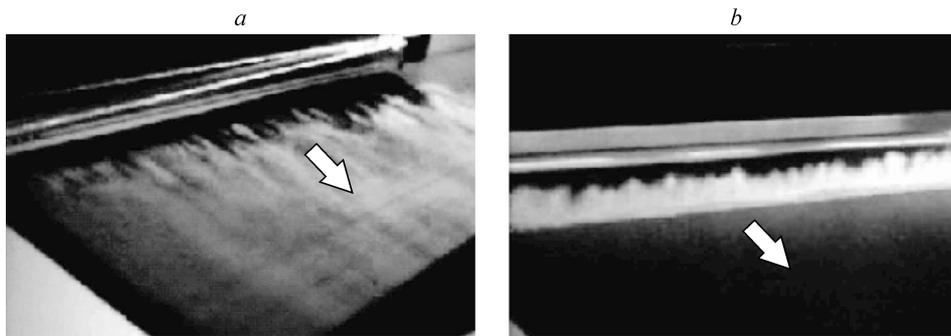


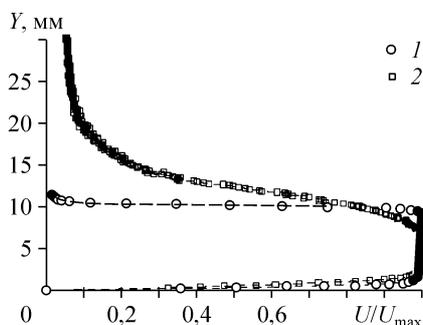
Рис. 2. Дымовая визуализация течения пристенной струи в естественных условиях, сечения XZ (a) и YZ (b). Направление потока указано стрелкой.

располагался параллельно стенке, и продольные стрики при таком положении ножа становились хорошо различимы в плоскости координат XZ . Было установлено что на начальных этапах развития струи формируется неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, которая ведет к последовательному сворачиванию слоя сдвига в вихревые структуры. Ранее подобные наблюдения проводились для круглой струи [10], где было показано, что продольные структуры существуют между первичными вихревыми структурами. При расположении светового ножа перпендикулярно стенке продольные структуры также хорошо различимы (см. рис. 2, b), здесь показано сечение YZ струи. В процессе эксперимента возникло предположение, что их появление может быть связано с возмущениями, возникающими в стабилизирующей камере выше по течению.

Пристенную струю разделяют на две основные области — свободный слой сдвига, развивающийся на значительном расстоянии от стенки, и пограничный слой, существующий вблизи поверхности, рис. 3. Измерения в пристенной области показали, что ламинарный режим течения и профиль скорости достаточно хорошо согласуются с профилем Блазиуса. Ниже по потоку, начиная примерно с $x/b = 5$, высокий уровень турбулентности верхней части пристенной струи ведет к переходу в ее внутренней области. Во внешней части пристенной струи (рис. 4, a) в интервале $0,5 < x/b < 2,5$ профили скорости, обезразмеренные на локальную максимальную скорость и толщину потери импульса в слое сдвига, подобны.

ИЗУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННО ГЕНЕРИРОВАННЫХ СТРИКОВ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОАНОМЕТРА

Для пространственной стабилизации трехмерных структур использовались шероховатости, которые помещались на выходе из сопла, и в этом случае искусственно возбужденные продольные структуры появляются в фиксированных позициях. Обеспечив стационарность структур, стало возможным провести



детальное термоанемометрическое исследование течения. На внутренней поверхности верхней кромки сопла были наклеены пять элементов шероховатости, каждый из них имел толщину 0,22 мм, длину 15 мм и ширину 7,5 мм. Профили средней скорости, полученные в области за и между

Рис. 3. Профили средней скорости при $U_i = 8$ м/с, $X = 1$ (1), 51 (2) мм.

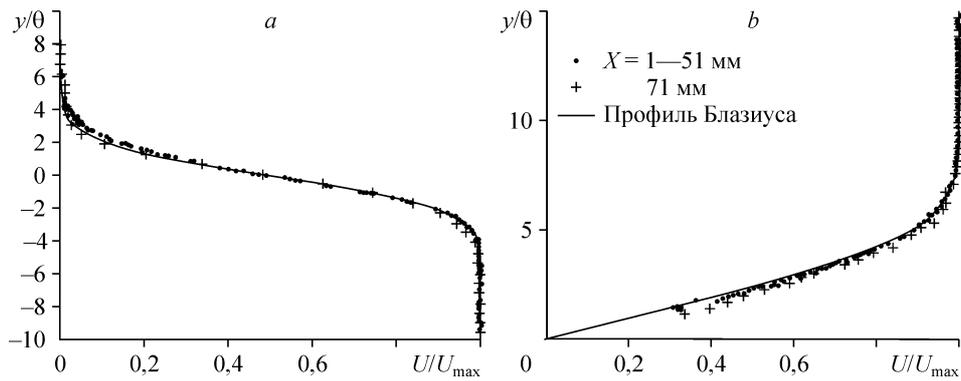


Рис. 4. Профили средней скорости при 8 м/с. Область слоя сдвига в верхней части пристенной струи (а) и профили средней скорости вблизи стенки (b).

шероховатостями для различных продольных координат x , свидетельствуют о том, что скорость за шероховатостью (т. е. в области между продольными структурами) ниже, чем в области между шероховатостями (т. е. непосредственно в самой продольной структуре). Максимум среднеквадратичных пульсаций, начиная с координаты $x = 20$ мм, находится в верхней части слоя сдвига.

Для более наглядного представления процесса развития возмущения и выделения его из общей картины течения область измерений также включала невозмущенные, периферийные участки течения. В процессе обработки данных из профилей, измеренных в возмущенной области, вычитались профили без возмущений. Таким образом выделялся дефект и превышение скорости возмущенного течения относительно невозмущенного, основываясь на измерениях, выполненных в 3000 точках. Далее по равным их значениям для различных сечений строилась изоповерхность. На рис. 5 и 6 показаны результаты термоанемометрических измерений, полученные с использованием элементов шероховатости, в свободном слое сдвига и пограничном слое пристенной струи. Продольные структуры, полученные

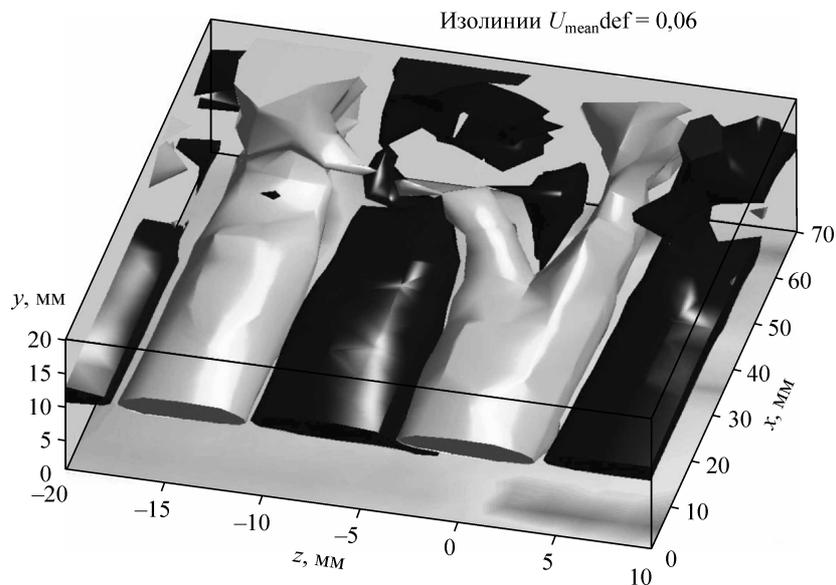


Рис. 5. Продольные структуры в свободном слое сдвига показаны изоповерхностями, дефект средней скорости показан темным цветом, превышение — светлым.

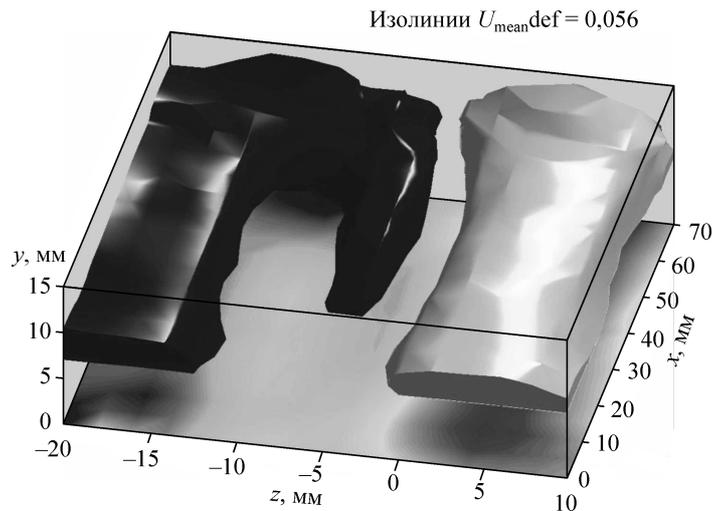


Рис. 6. Продольные структуры в пограничном слое показаны изоповерхностями, дефект средней скорости показан темным цветом, превышение — светлым.

в естественных условиях, имеют разные поперечные размеры и появляются на различном расстоянии от сопла. Было установлено, что искусственно генерируемые продольные структуры в свободном слое сдвига стабилизируют возмущения в пограничном слое. Поперечный размер структур в пограничном слое отличается от размера в свободном слое сдвига. На рис. 6 показаны продольные структуры, возникающие в естественных условиях в пристенном пограничном слое, когда на верхней части сопла наклеены шероховатости. На обоих рисунках изображена изоповерхность дефекта и превышения мгновенной скорости относительно осредненной скорости в поперечном направлении. Следует отметить разные масштабы структур на этих рисунках. Как видно по шкале на оси Y , они отличаются в три раза. Характерный поперечный размер структур в пограничном слое примерно в два раза больше, чем в свободном слое сдвига. Наличие трехмерных структур во внутреннем слое более значимо для процесса перехода, чем во внешнем слое, где преобладают двумерные волны. Такой сценарий полностью согласуется с процессом классического перехода. Однако возникает ряд важных вопросов, например: каков оптимальный размер продольных структур и как размер шероховатостей влияет на процесс генерации структур. Для этого были проведены эксперименты, в которых использовались шероховатости различной ширины: 5, 7,5, 10, 12 мм. К внутренней поверхности верхней кромки сопла было приклеено по 4 шероховатости каждого размера, расстояние между двумя ближайшими шероховатостями равнялось их размеру (рис. 7).

Рис. 8, *a* демонстрирует распределение дефекта и превышения скорости в верхней области слоя сдвига, которые были получены, используя подобную термоанемометрическую технологию и координатник, как было описано выше. Размер шероховатостей увеличивался слева направо, с 5 до 12,5 мм. Экспериментальные данные получены в 24336 точках с одинаковым пространственным разрешением. Следует отметить, что на начальной стадии наиболее устойчивые вихревые структуры развиваются позади широких

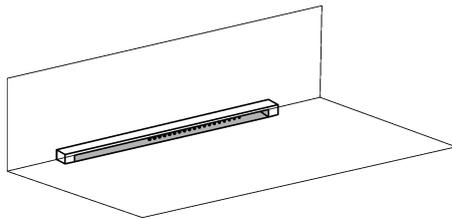


Рис. 7. Схема расположения шероховатостей на внутренней кромке сопла.

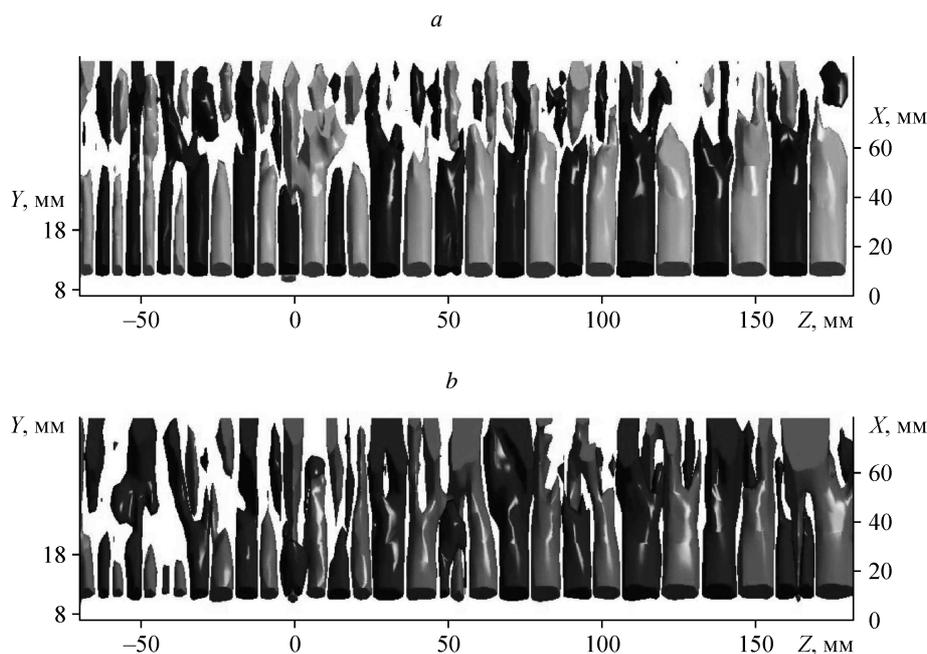


Рис. 8. Продольные структуры, развивающиеся за шероховатостями, с различной периодичностью в свободном слое сдвига. Дефект средней скорости показан светлым, превышение — темным цветом. $U_i = 8$ (a), 15 (b) м/с.

шероховатостей размером 10 и 12,5 мм, что соответствует поперечным волновым числам 20–25 мм.

Для изучения влияния числа Рейнольдса на характеристики продольных структур была проведена дополнительная серия экспериментов. Скорость потока струи U_i увеличена и составляла 15 м/с. Измерения выполнялись с помощью термоанемометра. Количественные данные (см. рис. 8, a) получены с помощью термоанемометрической визуализации, подобной той, которая показана на рис. 8, b. Сравнивая данные, полученные при разных скоростях, было установлено, что увеличение скорости ведет к ускорению процесса перехода и уменьшению характерного размера продольных структур. Этот факт может быть объяснен изменением размера слоя сдвига: увеличение скорости струи ведет к утончению слоя сдвига и, соответственно, размер продольных структур уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Эти результаты показаны на рис. 9, b.

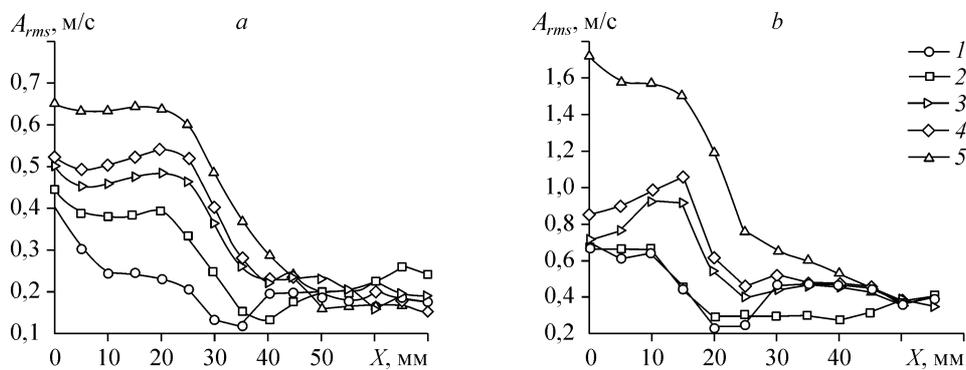


Рис. 9. Изменение характерных размеров продольных структур при 8 (a) и 15 (b) м/с. Длина волны: 5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4), 25 (5) мм.

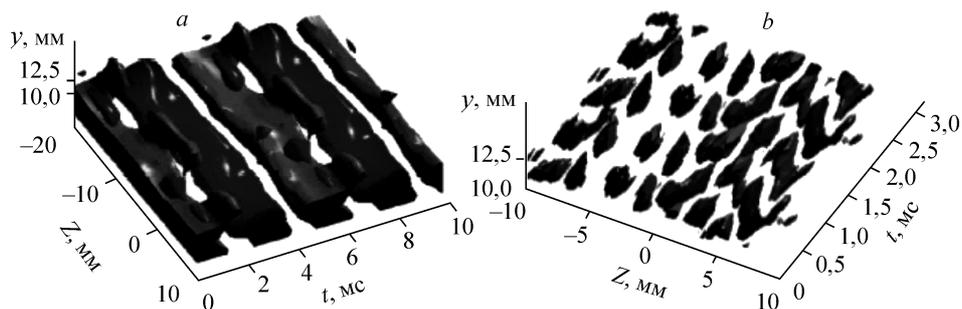


Рис. 10. Искажение двумерной волны продольными структурами и акустическим воздействием. Частота 200 (а) и 700 (б) Гц. Скорость на выходе равна 8 м/с. Уровень изоповерхностей: $U_{\max} = 0,3$ (а), 0,4 (б), $x = 41$ (а), 21 (б) мм.

АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ

Искусственное возбуждение вихрей Кельвина–Гельмгольца в свободном слое сдвига пристенной струи позволяет изучать влияние частоты двумерных волн на генерацию и характеристики образующихся продольных возмущений. При помощи динамика, расположенного вблизи сопла, генерировались волны неустойчивости различной частоты. Было установлено, что частота образующихся вихрей Кельвина–Гельмгольца имеет сильное влияние на размер продольных вихревых структур в поперечном направлении и их амплитуду. На рис. 10 сравниваются два наиболее показательных случая: частота составляет 200 Гц (а) и 700 Гц (б). Дымовая визуализация для этих случаев показана на рис. 11. Следует отметить, что при

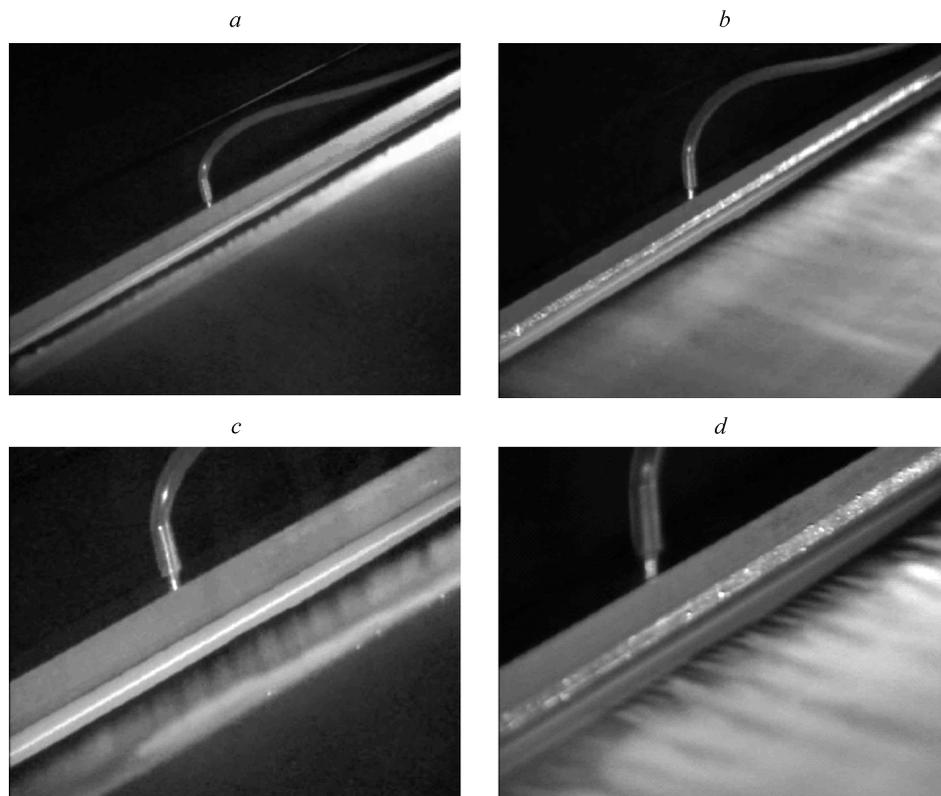


Рис. 11. Продольные структуры, создаваемые шероховатостями при частоте 200 (а, б), и 700 (с, д) Гц в свободном слое сдвига.

искусственном возбуждении двумерной волны с частотой 200 Гц ниже по течению поток становился трехмерным, однако трехмерность в этом случае выражалась слабо и процесс турбулизации, главным образом, носил двумерный характер, тогда как при частоте 700 Гц наблюдалось развитое трехмерное течение.

ВЫВОДЫ

1. Детальные термоанемометрические измерения и дымовая визуализация показали, что в плоской пристенной струе продольные структуры могут генерироваться непосредственно на выходе из сопла.

2. Установлено, что поперечный размер шероховатостей коррелирует с поперечным размером продольных структур. В частности, размер продольных структур в области пограничного слоя примерно в 2 раза больше, чем в свободном слое сдвига благодаря тому, что, возможно, устойчивость слоев разная.

3. Искусственное возбуждение двумерных волн Кельвина–Гельмгольца различной частоты оказывает влияние на размер в поперечном направлении и амплитуду продольных структур. Взаимодействие двумерной неустойчивости с трехмерными полосчатыми структурами позволяет ускорять или затягивать процесс турбулизации струи.

4. По результатам дымовой визуализации и термоанемометрических измерений установлено, что увеличение числа Рейнольдса на выходе приводит к ускорению процесса турбулизации струи и уменьшению характеристического размера продольных структур, что вызвано уменьшением толщины слоев сдвига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ho C.M., Huerre P. Perturbed free shear layer // Ann. Rev. Fluid. Mech. — 1984. — Vol. 16. — 365 p.
2. Bernal L., Roshko A. Streamwise vortex structure in plane mixing layers // J. Fluid Mech. — 1986. — Vol. 170. — 499 p.
3. Lasheras J.C., Cho J.S. and Maxworthy T. On the origin and evolution of streamwise vertical structures in a plane, free shear layer // J. Fluid Mech. — 1986. — Vol. 172. — 231 p.
4. Liepmann D., Ghatib M. The role of streamwise vorticity in the entrainment of round jet // J. Fluid Mech. — 1992. — Vol. 245. — 643 p.
5. Metcalfe R.W., Orszag S.A., Brachet M.E., Menon S., Riley J.J. Secondary instability of a temporally growing mixing layer // J. Fluid Mech. — 1987. — Vol. 184. — 207 p.
6. Balaras E., Piomelli U., Wallage J.M. Self-similar states in turbulent mixing layers // J. Fluid Mech. — 2001. — Vol. 446. — 1 p.
7. Stanley S.A., Sarkar S., Mellado J.P. A study of the flow-field evolution and mixing in a planar turbulent jet using direct numerical simulation // J. Fluid Mech. — 2002. — Vol. 450. — 377 p.
8. Mattson O.J.E. Experiments on streamwise vortices in curved wall jet flow // Phys. Fluids. — 1995. — Vol.7, No. 12. — P. 2978.
9. Likhachev O., Neuendorf R., Wagnanski I. On streamwise vortices in a turbulent wall-jet that flows over a convex surface // Phys. Fluids. — 2001. — Vol. 13, No. 6. — P. 1822.
10. Monkewitz P.A., Pfizenmaier E. Mixing by side jets in strongly forced and self-excited round jets // Phys. Fluids A. — 1991. — No. 3. — P. 1356.

Статья поступила в редакцию 21 мая 2007 г.