

¹ Chalmers University of Technology
Strömninglära, SE-412 96, Gøteborg, Sweden

² Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: physics@vestnik.nsu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПРИСТЕННОЙ СТРУИ МЕТОДОМ PIV *

Экспериментально исследована структура течения плоской пристенной струи при помощи дымовой визуализации и PIV метода. Представлены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скоростей для различных сечений струи. Показаны особенности развития и взаимодействия образующихся вихрей Кельвина – Гельмгольца и продольных структур.

Ключевые слова: плоская струя, устойчивость, восприимчивость, дымовая визуализация, PIV (Particle Image Velocimetry).

Введение

В настоящее время актуальность изучения струй, в частности пристенных струй, не вызывает никакого сомнения, поскольку важность понимания физических процессов, происходящих в данных течениях, обусловлена широким практическим применением. Примеров тому множество – от пленочного охлаждения лопаток в турбинах двигателей и камер сгорания до систем противообледенения автомобилей и самолетов. Тем не менее для более эффективного применения струйных течений необходимо более глубокое понимание процесса развития и взаимодействия струй. В то же время появление новых методов исследований позволяет расширить область знаний. Данная серия экспериментов была проведена с помощью PIV метода. В ходе эксперимента изучались качественные и количественные характеристики развития струи.

Хорошо известен тот факт, что в струях, слоях сдвига и смещения при любом числе Рейнольдса возникает неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, которая вниз по потоку усиливается, и в определенный мо-

мент формируются первичные, нелинейные двумерные вихри Кельвина – Гельмгольца. При определенных условиях, в промежутках между двумя следующими друг за другом двумерными поперечными вихрями, возникают также парные продольные вихри, вращающиеся в противоположные стороны (см., например, обзорную работу [1]). При эволюции течения окончательная его турбулизация происходит в результате усиления и взаимодействия вышеупомянутых структур обоих типов. Возможен также и сценарий развития субгармонической неустойчивости, которая приводит к спариванию вихрей Кельвина – Гельмгольца без образования продольных структур.

Следует отметить, что имеется малое количество опубликованных работ, посвященных трехмерным процессам ламинарно-турбулентного перехода в приложении к пристенным струйным течениям. В большинстве своем предыдущие исследования рассматривают слои сдвига и смещения, а также пристенные струйные течения на выпуклых или вогнутых поверхностях, в которых наблюдаются продольные структуры (подробнее об этом см. [2]). Как было

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-01-00027), Президента Российской Федерации (НШ-454.2008.1; МК-420.2008.1) и Министерства образования и науки РФ (проект РНП. 2.1.2.541).

отмечено в работе [3], пристенная струя представляется особенным случаем, интересным для изучения как смесь свободного сдвигового и граничащего со стенкой течений, в которых происходит взаимодействие между дву- и трехмерными структурами. В [3] было показано, что структуры, развивающиеся в двух сдвиговых слоях пристенной струи, имеют различные поперечные масштабы и появляются на разном расстоянии от сопла. Также было исследовано влияние скорости потока на развитие продольных структур и взаимодействие продольных возмущений в пограничном слое и слое сдвига. Следует также отметить работы [4; 5], где представлены результаты термоанемометрических измерений, и работу [6], выполненную с помощью дымовой визуализации. В работе [4] в дополнение к экспериментам проводились исследования с помощью линейной теории устойчивости и прямого численного моделирования.

Важным результатом работы [4] является доказательство того, что в пристенной струе существует ярко выраженный механизм выделения продольных масштабов, связанный с транзитным ростом. Кроме того, из [4] следует, что в пристенных струях возможны несколько сценариев нелинейного взаимодействия, как и в слоях сдвига и смешения, и действует как минимум два возможных механизма вторичной неустойчивости двумерных вихрей. Развитие субгармонической неустойчивости приводит к спариванию вихрей, а трехмерная неустойчивость – к поперечной модуляции продольными вихрями. Ранее подобные результаты были получены в [5] для слоев сдвига и смешения. По результатам работ [4; 5] можно сделать

вывод, что в условиях низкой начальной возмущенности пристенной струи будет преобладать субгармоническая вторичная неустойчивость двумерных вихрей, а в условиях присутствия возмущений продольной завихренности будет доминировать трехмерная вторичная неустойчивость, приводящая к росту продольных структур и подавлению спаривания вихрей.

Целью данной работы являлось исследование механизмов возникновения и развития продольных структур, их взаимодействия с вихрями Кельвина – Гельмгольца, а также их роли в процессе ламинарно-турбулентного перехода посредством PIV метода.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты проводились на установке плоской пристенной струи в Чалмерском техническом университете (Гетеборг, Швеция), которая показана на рис. 1. Пристенная струя формировалась при выходе потока из двумерного сопла и развивалась вдоль горизонтальной плоской пластины длиной 3,2 м и шириной около 1 м. Высота сопла составляла 12 мм, ширина – 500 мм. Используемая система координат изображена на рис. 1: ось x имеет продольное относительно потока направление, ось y – нормальное к стенке направление, ось z – поперечное к потоку направление. Установка была оснащена вертикальной стенкой высотой около 1 м, расположенной над соплом, и боковыми стенками такой же высоты, что позволяло проводить эксперимент в неподвижной окружающей среде.

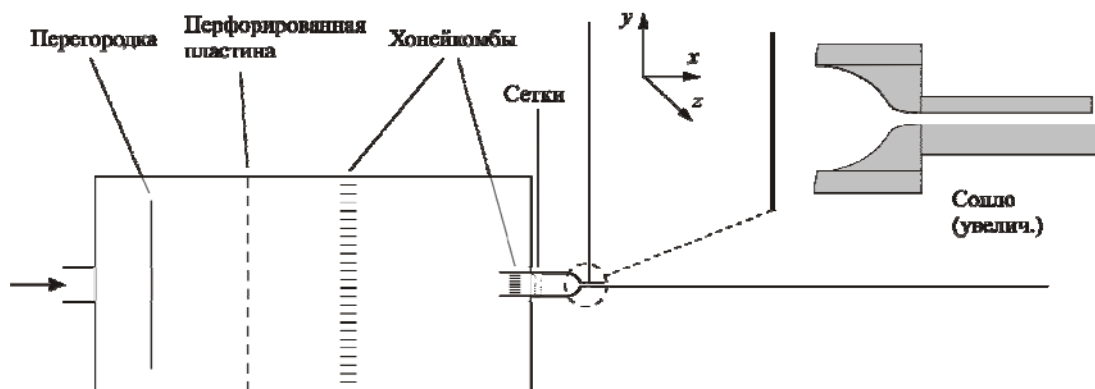


Рис. 1. Схема установки для получения пристенной струи

Воздух нагнетался вентилятором в форкамеру, в которой были установлены перфорированная пластина, 2 хонейкомба и сетки, после чего поток направлялся в сопло с коэффициентом поджатия 9 : 1. Уровень турбулентности, измеренный на выходе из сопла в частотном диапазоне от 10 Гц до 10 кГц, составлял менее 0,05 %, число Рейнольдса по высоте сопла $0,3 \cdot 10^4$. В процессе измерений, скорость U_0 контролировалась трубкой Пито-Прандтля, расположенной в ядре струи.

Двумерные волновые возмущения вводились в поток искусственно посредством громкоговорителя, расположенного вне струи на некотором от нее расстоянии. Величина безразмерного частотного параметра $2\pi f\nu/U_0^2 \cdot 10^6$ составила около 450. Пульсации лазерного ножа были синхронизированы с возбуждающим акустическим сигналом. Трехмерные возмущения искусственным образом не генерировались, а возникали естественным образом из возмущений продольной завихренности в тракте установки.

Измерения выполнялись методом определения поля скорости по трекам частиц при помощи PIV (Particle Image Velocimetry). PIV система состояла из двухрезонаторного (мощностью 400 мДж каждый) Nd:YAG лазера (рис. 2) с длиной волны 532 нм и частотой генерируемых пульсаций 15 Гц. Длительность лазерного импульса 8,0 нс. Регистрация снимков осуществлялась цифровой камерой Kodak ES 1.0 CCD с высоким разрешением (1 008 пикселей). Для управления процессом измерений и сбора данных использовалось программное обеспечение фирмы «DANTEC Measurement Technology», дальнейшая обработка снимков выполнялась в программной среде Mat-

lab по стандартной схеме, характерной для PIV измерений. В качестве частиц, вносимых в поток для регистрации их перемещения, использовался пропилен гликоль (1,2-Пропандиол, разбавленный 40 % воды). Раствор испарялся в генераторе дыма ZR-31 и подавался в необходимой концентрации в рабочий тракт установки. Размер частиц составлял примерно 2,0–2,5 мкм.

Результаты эксперимента

Дымовая визуализация течения. Важность роли трехмерных эффектов в процессе ламинарно-турбулентного перехода в пристенной струе отчетливо демонстрируют визуализационные картины, приведенные на рис. 3. Течение было визуализировано с помощью пульсирующего лазерного ножа и дыма. Этот метод позволяет изучать возмущения только в верхнем сдвиговом слое, где имеется отчетливое различие в концентрации дыма на границе с неподвижным окружением. Волновые возмущения возбуждались с помощью акустического громкоговорителя, величина безразмерного частотного параметра $2\pi f\nu/U_0^2 \cdot 10^6$ была около 450. Пульсации лазерного ножа были синхронизированы с возбуждающим акустическим сигналом.

На рис. 3 слева представлены визуализации струи, когда лазерный нож располагался параллельно стенке, в плоскости координат xz при $y/b = 1,4$ (рис. 3, *a*), и при $y/b = 1,6$ (рис. 3, *b*); здесь b – высота сопла). На рис. 3, *a* в верхней части снимка отчетливо видны двумерные волны, развивающиеся параллельно кромке сопла. Ниже на снимке (т. е. ниже по потоку) видны также продольные структуры. Первоначально в потоке доминируют волны, и продольные структуры имеют ма-

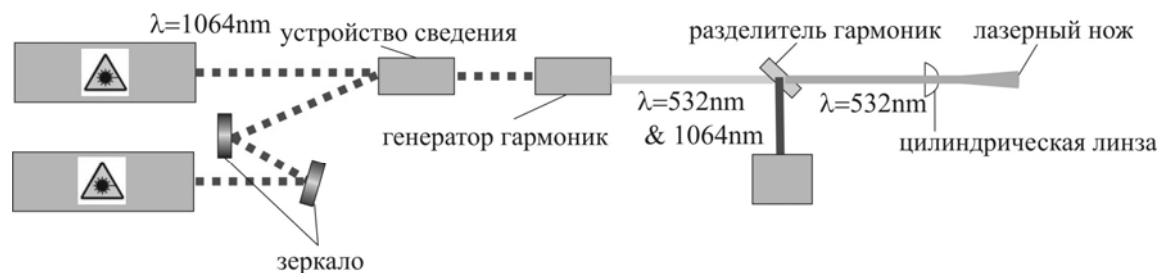


Рис. 2. Схема источника когерентного излучения аппарата Particle Image Velocimetry

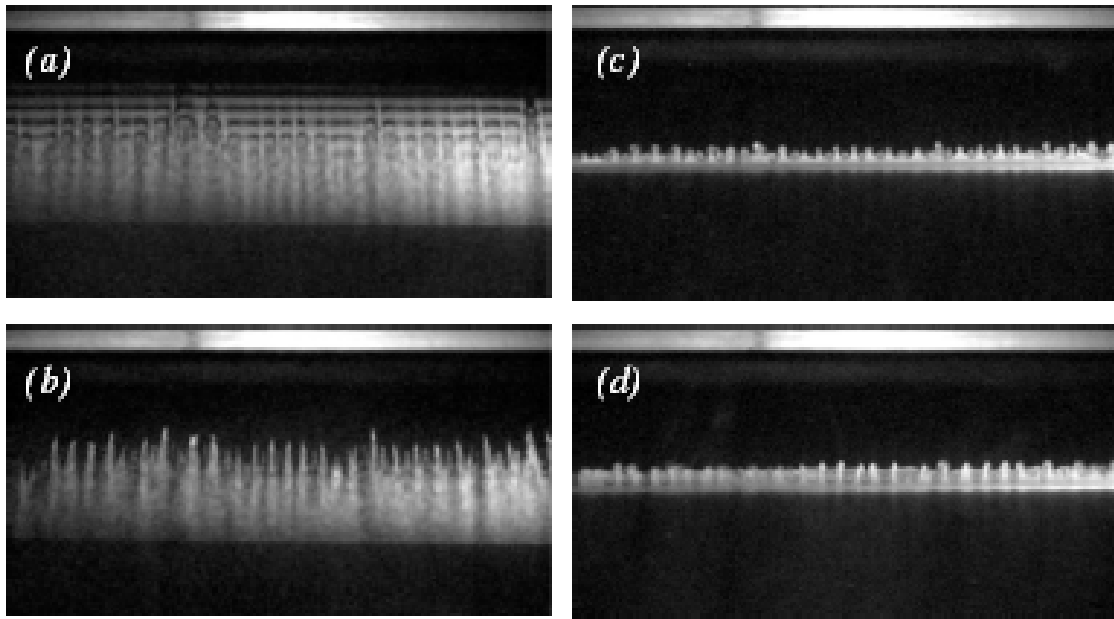


Рис. 3. Визуализация нелинейных структур в пристенной струе при $Re = 0,3 \cdot 10^4$. Лазерный нож расположен параллельно плоскости xz при $y/b = 1,4$ (а) и $y/b = 1,6$ (б). Лазерный нож перпендикулярен потоку, в плоскости yz при $x/b = 13$ (в, з) во впадине (в) и горбе (з) волны

лую амплитуду, а вниз по течению становятся доминирующими полосчатые структуры. Необходимо отметить, что трехмерные возмущения в данном эксперименте возникают естественным образом, от существующих неоднородностей в установке, но, тем не менее, они очень ярко выражены и однородны по пространству. При перемещении лазерного ножа выше от стенки (рис. 3, б) видны области, где продольные структуры существуют, в то время как волн нет.

На рис. 4 справа представлена визуализация струи, когда лазерный нож располагался перпендикулярно стенке, в плоскости

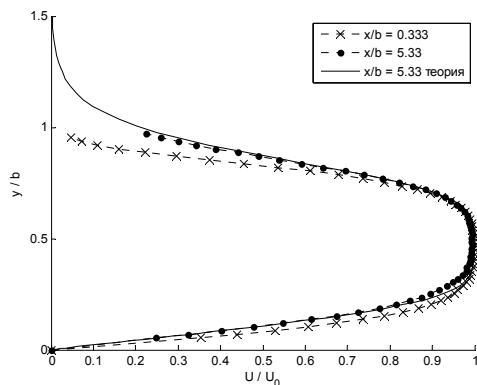


Рис. 4. Профили средней скорости в пристенной струе при $Re = 0,3 \cdot 10^4$. Сплошной линией показан расчет по теории [4]

координат yz . Рис 3, в показывает область впадины волны, которая соответствует приблизительно середине местоположения на рис 3, а. В данном месте отчетливо видны продольные структуры, и они приобретают типичную грибообразную форму. На рис 3, з показана область горба волны. В данном месте продольные структуры имеют другую топологию в результате наложения сильного двумерного вихря. Как видно, продольные структуры пронизывают всю пристенную струю и выбрасываются в ее верхние слои.

Из данных визуализаций отчетливо видно, что продольные возмущения усиливаются вниз по течению струи. Кроме того, представляется возможным определить положение и характерный размер естественных продольных структур.

Как уже было отмечено, трехмерные возмущения в данном эксперименте возникают естественным образом, от существующих неоднородностей в установке. Развитие продольных возмущений определяется механизмами выделения масштабов. На начальном этапе, возможно, действует механизм транзитного роста [4]. Этот механизм может оказывать влияние и на последующие нелинейные взаимодействия. Как следует из визуализаций на рис. 3, зна-

чительное усиление продольных структур происходит именно в результате действия нелинейных механизмов, ниже по потоку. В результате вторичной неустойчивости вихрей Кельвина – Гельмгольца происходит их искажение и образование продольных «ребер» между первичными структурами. Такой сценарий развития неустойчивостей характерен и для круглой струи [6].

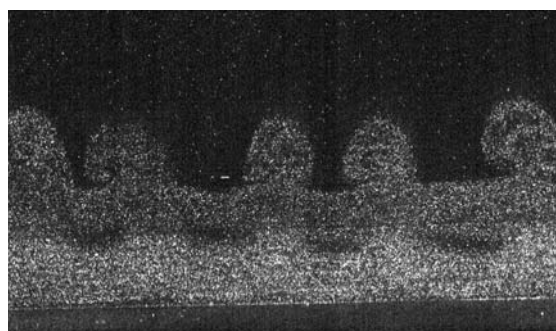
Характеристики среднего течения. В используемой экспериментальной установке не было оптического доступа для измерений в плоскости xu , поэтому профили средней скорости плоской струи были измерены с помощью термоанемометра. Использовался датчик для пограничного слоя фирмы DANTEC с вольфрамовой нитью длиной 0,7 мм и диаметром 5 микрон. Мост термоанемометра (также фирмы DANTEC) работал в режиме постоянной температуры, перегрев нити датчика составлял 1,8.

Измеренные профили продольной компоненты скорости при $Re = 0,3 \cdot 10^4$ показаны на рис. 4 для двух различных расстояний от щели. Характерной особенностью данной установки было удлиненное сопло струи. Такое решение было применено для того, чтобы добиться течения, в котором верхний и нижний сдвиговые слои взаимодействуют до наступления ламинарно-турбулентного перехода. Данное течение отличается от асимптотического течения Глауэрта [7] и может быть описано модифицированными уравнениями Блазиуса, как это было показано в [4]. Из рис. 4 видно, как начальный профиль на выходе из канала при $x/b = 0,333$ преобразуется в характерный профиль пристенной струи при $x/b = 5,33$. Также может быть отмечено довольно хорошее согласование с теоретическим решением Блазиуса [4], которое на графике показано тонкой сплошной линией. Согласование теории с экспериментом проводилось по методике, описанной в [4]:

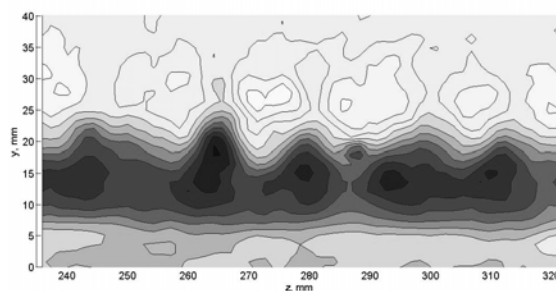
$$\begin{aligned} (x + x_0) / b &= 15, \\ x / b &= x / l \cdot \left(\frac{Re_\delta}{b / \delta} \right), \\ y / b &= y / \delta \cdot \left(\frac{1}{b / \delta} \right), \\ y / b & \frac{x}{b Re_b}, \end{aligned}$$

где x, y, z – продольная, нормальная, поперечная координаты; x_0 – начальная позиция по x ; l – масштаб длины; b – высота сопла; δ – толщина пограничного слоя; Re_δ – число Рейнольдса, рассчитанное по толщине пограничного слоя.

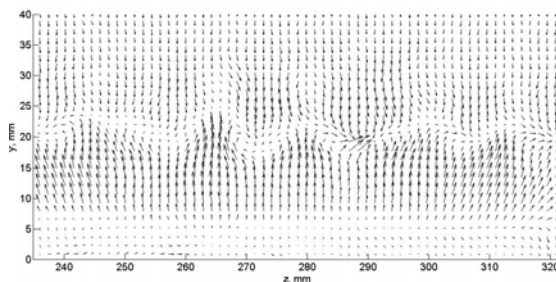
Следующим этапом в данной серии экспериментов было проведение PIV измерений. На рис. 5 представлен один из снимков, выполненный в плоскости yz . Скорость потока в ядре струи $U_0 = 3,9$ м/с. На темном фоне видна область развития струи с внесенными в нее частицами. Ниже показан результат, полученный после обработки данных. Изолинии равных скоростей и векторное поле скоростей, состоящее из V - и W -компонент, показывает сложную структуру течения.



а



б



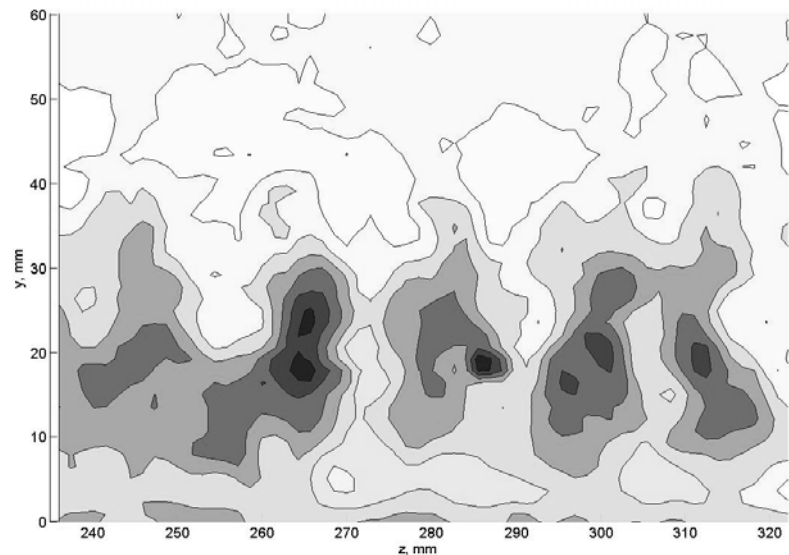
в

Рис. 5. Снимок в yz -плоскости (а), изолинии V -компоненты скорости (б), векторное поле скоростей для V - и W -компонент (в), $x = 102$ мм

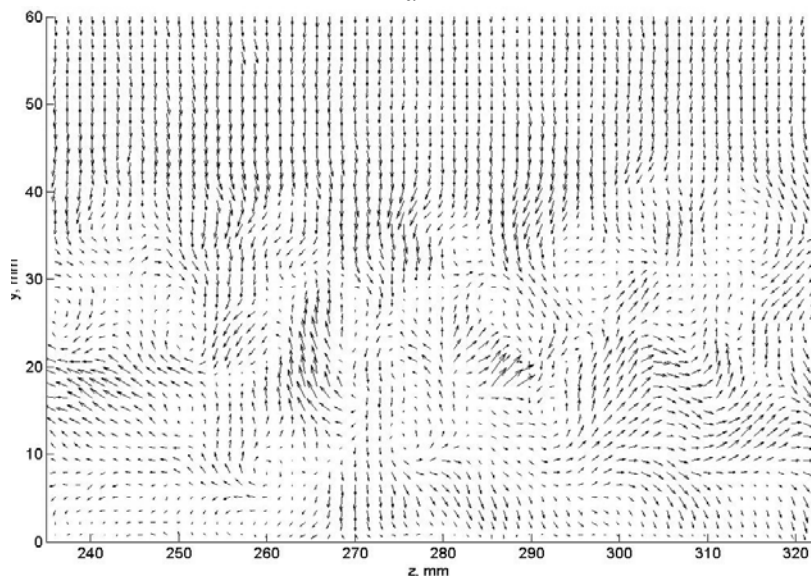
Снимок (рис. 5, *a*) выполнен на расстоянии 102 мм от сопла. На темном фоне явно выражены грибообразные структуры. При рассмотрении результатов PIV измерений, произведенных в данном сечении (рис. 5, *б, в*), можно наблюдать картину движения жидкости в векторном виде. Изолиниями показаны максимумы V -компоненты скорости. Таким образом, PIV метод вполне корректно и информативно отображает картину течения в данном случае.

В то же время там, где течение становится более сложным (рис. 6), этот метод, на наш взгляд, требует дополнительных исследова-

ний для полноты представления картины течения. Рассматривая zx -сечение (рис. 7), можно отметить достаточно четкие контуры колец Кельвина – Гельмгольца, искаженные развитием продольных структур. Это подтверждает векторная картина (рис. 8). На начальном этапе происходит развитие двумерных волн, далее, ниже по течению, на волнах развивается вторичная неустойчивость, волна локально опрокидывается, и в верхних слоях пограничного слоя развивается продольная структура. У векторов скорости появляется поперечная к потоку W -компонента, течение становится трехмерным.



a



б

Рис. 6. Изолинии V -компоненты скорости (*a*) и векторное поле скоростей для V - и W -компонент скорости (*б*), $x = 154$ мм

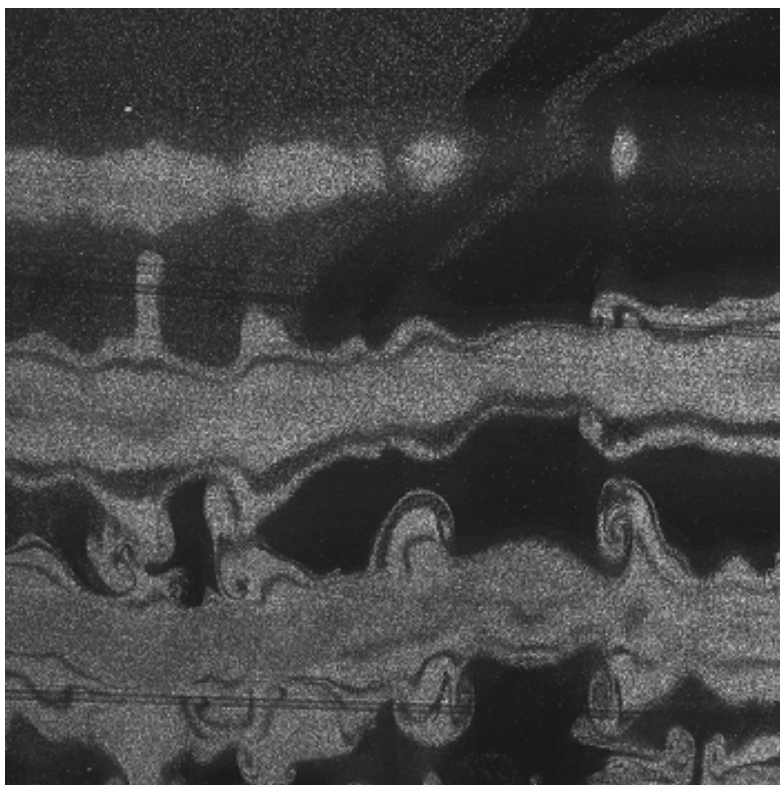


Рис. 7. Визуализация пристенной струи в xz -плоскости, $y = 19$ мм

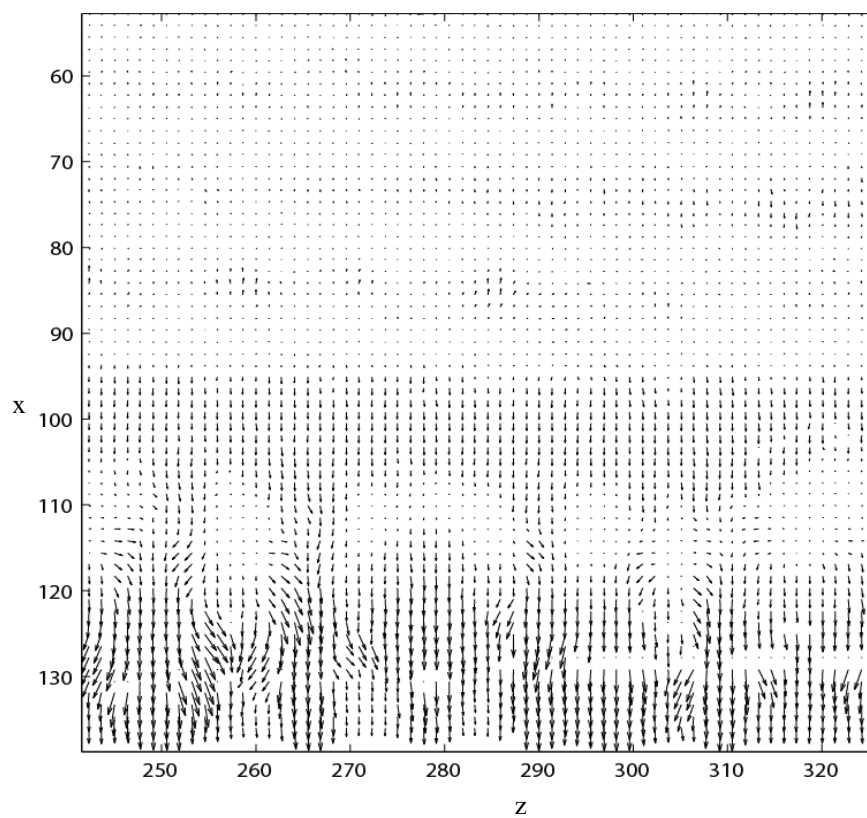


Рис. 8. Векторное поле скоростей для U - и W -компонент скорости (сечение xz), $y = 19$ мм

В целом, подводя итог проведенным исследованиям, отметим, что PIV метод вполне пригоден для регистрации таких сложных трехмерных течений, как пристенная струя, позволяющий к качественной информации, получаемой методом визуализации течения, добавить принципиально важную количественную информацию, которую невозможно получить в таком сложном течении даже с помощью термоанемометрии.

Список литературы

1. Ho C. M., Huerre P. Perturbed Free Shear Layer // *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1984. Vol. 16. P. 365–424.
2. Чернорай В. Г., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Козлов В. В., Чередниченко Е. Е. Продольные структуры в ближнем поле плоской пристенной струи // *Теплофизика и аэромеханика.* 2007. Т. 14, № 4. С. 1–9.
3. Litvinenko M. V. On the Formation and Role of the Longitudinal Structures during the

Laminar Breakdown Process in Jets: Licentiate Thesis. Chalmers University of Technology, 2003.

4. Levin O., Chernoray V. G., Löfdahl L., Henningson D. S. A Study of the Blasius Wall Jet // *J. Fluid. Mech.* 2005. Vol. 539. P. 313–347.

5. Litvinenko M. V., Löfdahl L. On the Formation and Role of the Longitudinal Structures during the Laminar Flow Breakdown in Jets // *Proc. of the Int. Conf. on Methods of Aerophys. Res. Pt. 2.* Novosibirsk: Publishing House «Nonparel», 2004. P. 125–129.

6. Litvinenko M. V., Chernoray V. G., Löfdahl L., Kozlov V. V. A Visualization Study of the Longitudinal Structures of a Plane Wall-Jet // *Proc. of the 7th Asian Symp. on Visualization.* 2003. Paper № Conf.24-A149.

7. Glauert M. B. The Wall Jet // *J. Fluid. Mech.* 1956. Vol. 1. P. 625–643.

Материал поступил в редколлегию 25.03.2009

V. G. Chernoray, Yu. A. Litvinenko

INVESTIGATION OF A PLANE WALL JET BY PIV

The structure of a plane wall jet by means of smoke visualization and PIV measurements is investigated experimentally. Instantaneous and ensemble-averaged the flow fields for different cross-sections are presented. Features of the development and interaction of the Kelvin-Helmholz vortex and longitudinal structures are shown.

Keywords: plane wall jet, stability, receptivity, smoke visualization, PIV (Particle Image Velocimetry).