

Ю. А. Литвиненко^{1,2}, М. В. Литвиненко¹,
М. М. Катасонов^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: litur@itam.nsc.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАЗВИТИЕ ПЛОСКОЙ МИКРОСТРУИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ *

Экспериментально исследовано влияние поперечного акустического поля на развитие плоской микроструи при малых числах Рейнольдса методом цифровой трассерной визуализации (англ. PIV – Particle Image Velocimetry). Измерения выполнены с синхронизацией фазы акустического сигнала и вспышки лазера. Представлены мгновенные поля скоростей для различных поперечных и продольных сечений. Показана восприимчивость плоской микроструи к нормальным акустическим колебаниям. Представлены PIV-образы, соответствующие им векторные поля и поля завихренности.

Ключевые слова: плоская микроструя, Particle Image Velocimetry (PIV), мгновенные поля скоростей, акустическое поле.

Введение

Актуальность исследований, посвященных микро- и нанотематике, в настоящее время не вызывает сомнения. Важность подобных исследований очевидна как для понимания природы физических явлений в микромире, так и для практического использования результатов в технике и медицине. Так, например, при сравнении сценариев развития микро- и макроструи обнаруживаются значимые отличия, и не учитывать их нельзя [5]. В настоящее время микротечения широко используются во множестве областей. Например, использование микроканалов позволяет при охлаждении значительно увеличить теплоотвод, более эффективно организовать струйное горение и т. д. Особое внимание уделяется

исследованию воздействия акустического поля на микрострую [1–4], что важно как для понимания физики процесса, так и для возможности практического использования явления, например в авиационной, космической, химической промышленности и т. д. Появление новых методов исследований позволяет расширить область знаний по микротечениям и понять процессы, происходящие в них.

Данная серия экспериментов была проведена с помощью PIV-метода. В ходе эксперимента изучались качественные и количественные характеристики микроструи при малых числах Рейнольдса в поперечном акустическом поле.

Из предыдущих экспериментов [5] известно, что воздействие поперечного акустического поля на микрострую оказывается

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №11-01-00292; 09-07-00480), Президента Российской Федерации (НШ-454.2008.1), Министерства образования и науки РФ (№ РНП.2.1.2.541) и ГК № 14.740.11.0354.

значительно более сильным, чем воздействие на макрострую, что связано, в первую очередь, с фактором масштаба. Так, например, отношение собственной энергии струи к энергии звукового колебания для макроструи $\gg 1$, а для микроструи ≤ 1 . В работе [5] данный эффект был ярко продемонстрирован для плоской микроструи и выражался в искажении вихревых жгутов на концах. Для плоских струй характерно развитие синусоидальной моды неустойчивости, которая наблюдается и в естественном случае (при отсутствии акустики) [9]. Однако экспериментальные исследования естественного случая развития неустойчивости могут носить лишь осредненный характер, поскольку фазовая информация будет практически потеряна. Тогда оправданным и физически верным, на наш взгляд, является способ генерации искусственных возмущений контролируемой частоты и фазы.

Таким образом, цель настоящих экспериментальных исследований состоит в изучении механизма развития плоской микроструи под воздействием акустического поля и сравнении полученных результатов с результатами последних исследований по данной тематике. Также хотелось бы отметить тот факт, что при уменьшении исследуемого объекта и соответственно области исследования появляется необходимость в новых методиках, которые способны разрешить данный размер и не внести посторонних возмущений. Если говорить о методах, позволяющих получить качественную информацию, то наиболее простым и эффек-

тивным является дымовая визуализация с использованием лазерного ножа. Описание и результаты, полученные с использованием данной методики, представлены в [6]. Такие стандартные методы, как термоанемометрия или пневмометрия в данных исследованиях не пригодны, поскольку осреднение измеряемых величин неприемлемо велико. Развитие бесконтактных методов, таких как PIV, позволило получить и количественную и качественную информацию сразу по всему полю течения.

Условия и методика эксперимента

Эксперименты проводились на установке плоской микроструи в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из вентилятора, переходника от круглого сечения к прямоугольному (I), хонейкомба (II), двумерного сопла (III), выполненного по схеме Витшинского с поджатием 14,4, и канала (IV) со следующими параметрами: длина (L) \times ширина (l) \times высота (h) – 260 \times 35 \times 2,5 мм. Используемая система координат изображена на рис. 1, ось x имеет продольное относительно потока направление, ось y – нормальное к большей стороне сопла направление, ось z – нормальное к меньшей стороне.

Искусственные возмущения вводились в поток посредством акустического динамика мощностью 20 Вт. Максимальный уровень

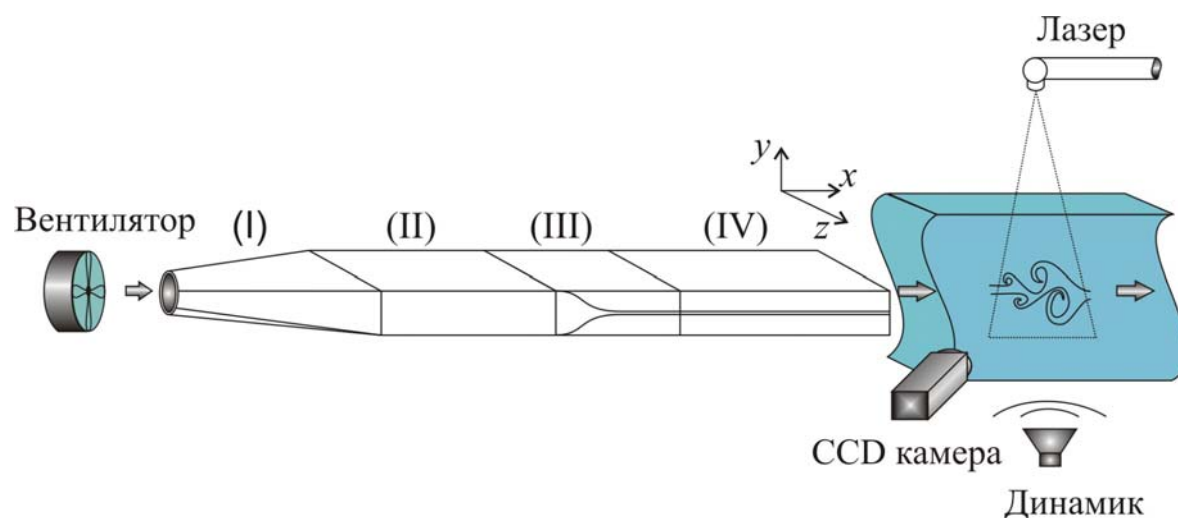


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

акустической мощности, используемый в эксперименте, составлял 90 дБ. Величина безразмерного частотного параметра, рассчитанная как $2\pi f\nu/U_0^2 \cdot 10^6$, равнялась 1 835. Для генерации акустического сигнала и синхронизирующего TTL-сигнала для процессора PIV использовалась плата National Instruments со специальным кодом, написанным в программном комплексе LabView. Исходящий синусоидальный сигнал усиливался и подавался на динамик, а TTL-сигнал поступал в процессор PIV и запускал вспышки лазера. Синхронизация по акустическому сигналу позволила сохранить фазовую информацию, поскольку вспышки осуществлялись при одной и той же фазе акустической волны. В ходе эксперимента измерены поперечные и продольные сечения микроструи. Источник акустических возмущений был ориентирован перпендикулярно большей стороне микроструи, на удалении 500 мм. Такая конфигурация сохранялась при измерении всех рассмотренных сечений. Измерения выполнялись методом цифровой трассерной визуализации (PIV-метод), относящимся к классу бесконтактных оптических методов, который позволяет регистрировать мгновенные поля скоростей в плоскости измерения.

PIV-система состоит из двойного импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны излучения 532 нм, длительностью импульса 10 нс. В ходе эксперимента временная задержка импульсов когерентного света варьировалась в пределах от 40 до 200 мкс, представленные данные выполнены при задержке 100 мкс, которая является наиболее оптимальной для используемых скоростей потока. Толщина лазерного «ножа», сформированного цилиндрической линзой, в измерительной области составляла 0,8 мм. Регистрация снимков осуществлялась цифровой камерой Видеоскан 11002/П/Д-2001 с разрешением $4\,004 \times 2\,671$ пикс, что соответствовало 95×63 мм. Совместно с камерой использовался объектив Sigma 105 mm F2.8 DG MACRO. В качестве трассеров использовалась смесь пропиленгликоля (1,2-пропандиол, разбавленный 40 % воды). Размер частиц составлял примерно 2,5–3,0 мкм. Раствор испарялся в генераторе дыма (ZR-31) и подавался с необходимой концентрацией в рабочий тракт установки. Для задымления внешнего пространства использовался аналогичный генератор дыма.

Измерительный комплекс PIV управлялся компьютером с программным обеспечением «ActualFlow», разработанным в Институте теплофизики СО РАН. Для перемещения микроструи использовалось координатное устройство с дискретностью перемещения 1,0 мкм.

Скорость струи на выходе из сопла составляла 2 м/с, что соответствовало числу Рейнольдса $0,33 \cdot 10^3$, рассчитанному по высоте сопла h . Исследования проводились на ламинарном участке развития микроструи, длина данного участка составляла около 10 калибров (длина ламинарной зоны к меньшей стороне сопла).

Результаты эксперимента

Плоская струя представляется достаточно простым режимом течения, однако чем больше исследований появляется в этом направлении, тем больше вопросов возникает по физическим механизмам, ответственным за развитие струи. В данной работе выполнены эксперименты по исследованию восприимчивости плоской микроструи к акустическим возмущениям, при этом источник возмущений располагался всегда перпендикулярно большей стороне сопла. Эксперименты, выполненные нами ранее с плоской макро- и микроструей [5], свидетельствуют о том, что в плоской струе преобладает неустойчивость синусоидального типа, выражающаяся в модуляции всей струи таким колебанием. Развитие синусоидальной неустойчивости является характерным явлением для плоской струи, оно также имеет место и при естественном случае и развивается аналогично искусственному (рис. 2). Исходя из этого, использование звуковых колебаний рассматривается нами как наиболее близкий к естественному способ воздействия. В то же время использование контролируемых возмущений дает для экспериментатора ряд преимуществ – таких, например, как синхронизация фазы возмущения. Немаловажным является вопрос о профиле скорости на срезе сопла. В наших исследованиях [7; 8] показано, что форма профиля скорости на выходе из сопла влияет на развитие течения. Так, например, наличие «ударного» профиля скорости с выраженной полкой, соответствующей ядру потока, способствует развитию в плоской струе трех различных зон неустойчивости. Значимым представляется

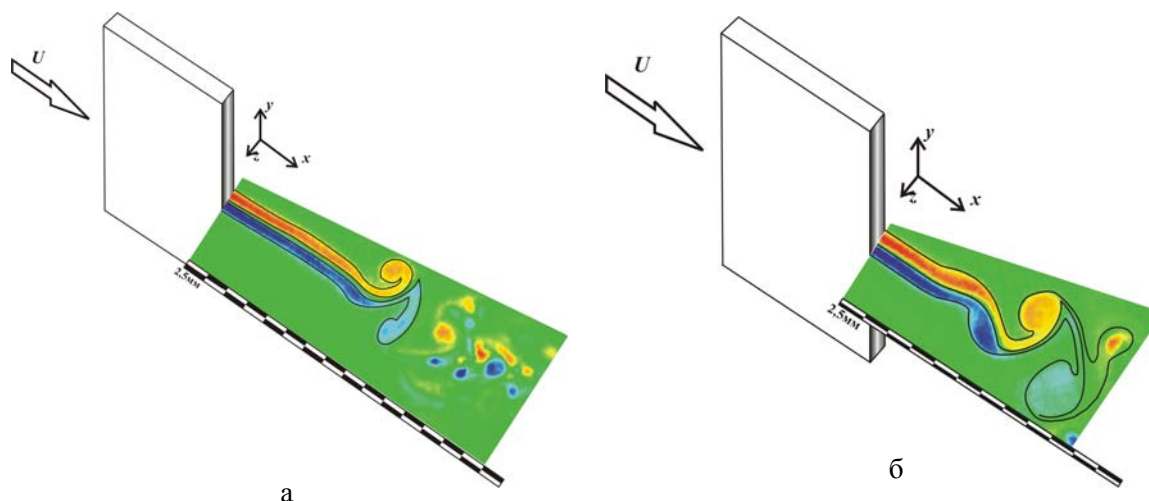


Рис. 2. Поле завихренности ω_z : а – естественный случай; б – $F = 60$ Гц.
Сечение xz , $y/l = 0,5$ (середина струи), высота сопла $h = 2,5$ мм

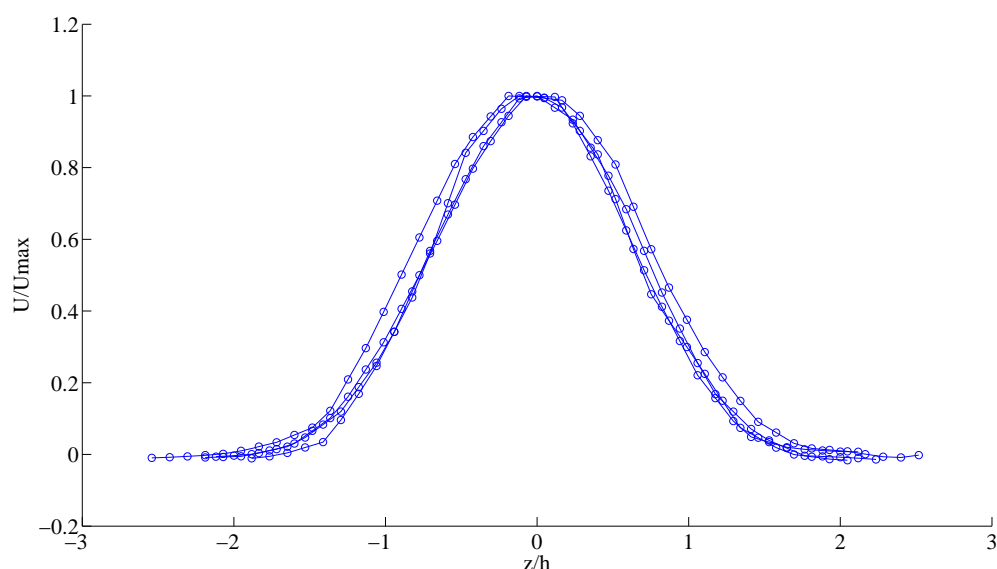


Рис. 3. Профили продольной компоненты мгновенной скорости
(сечение xz , $x = 2$ мм), $y/l = 0,5; 0,64; 0,78; 0,92$

тот факт, что развитие этих возмущений происходит независимо друг от друга. Два из них развиваются в слоях сдвига, а третье (синусоидальное) является «глобальным» и захватывает всю струю. В случае же параболического профиля скорости на выходе из сопла картина развития возмущений меняется. Вследствие увеличения толщин слоев сдвига, градиент скорости – от скорости в ядре до невозмущенного потока – понижается. Это способствует понижению темпов

роста возмущений в слоях сдвига либо их затуханию. И из трех зон неустойчивости, характерных для «ударного» профиля скорости, остается одна – синусоидальная, захватывающая всю струю. В данных исследованиях профиль скорости имел параболический вид. На рис. 3 представлены несколько профилей продольной компоненты мгновенной скорости – U , при $y/l = 0,5; 0,64; 0,78; 0,92$ (l – ширина сопла); $x/h = 1,25$.

Как видно, профили скорости однообразны для различных сечений, что говорит о реализации течения Пуазейля в микроканале и об однородном параболическом профиле на выходе из сопла по всей его высоте. Наличие параболического профиля скорости исключает развитие неустойчивостей, характерных для «ударных» профилей и позволяет исследовать плоскую струю, не смешивая множество факторов, влияющих на развитие.

Применение дымовой визуализации с использованием в качестве источника светового ножа лазера, синхронизованного с акустическим полем, позволяет получить качественную информацию о сложном трехмерном течении и является хорошим инструментом для исследования мини- и микротечений, в отличие от контактных методов, которые вносят недопустимый уровень воздействия на течение и искажают его. Однако этот метод позволяет изучать возмущения только в верхнем сдвиговом слое, где имеется отчетливое различие в концентрации дыма на границе с неподвижным окружением.

В ходе эксперимента были рассмотрены два случая развития плоской микроструи: естественный (без акустических возмущений) и с наложением акустических возмущений. На рис. 2 представлены мгновенные

поля завихренности ω_z , рассчитанной как

$$\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)$$

для случая естественных колебаний (рис. 2, а) и искусственно генерируемых акустическим воздействием (рис. 2, б).

Слева от поля завихренности представлена масштабная линейка, длина каждого сектора равняется высоте сопла h . Как видно, область невозмущенного течения в естественном случае составляет величину, равную двум длинам невозмущенной области с акустическим воздействием. В то же время процесс развития и разрушения квазидвумерных вихрей (англ. vortex rolls) для естественного случая протекает быстрее. В случае с акустическим полем, струя, модулированная акустическим возмущением, более устойчива, вихри имеют четкую локализацию.

На рис. 4 представлена мгновенная картина поля завихренности ω_z и векторного поля скоростей для U и V компонент скорости при акустическом возмущении с частотой $F = 60$ Гц при $y/h = 0,5$. Картина течения показывает, что акустические возмущения преобразуются в вертикальные вихревые жгуты с переменным знаком завихренности. Их развитие протекает в несимметричном порядке. Ниже по течению происходит

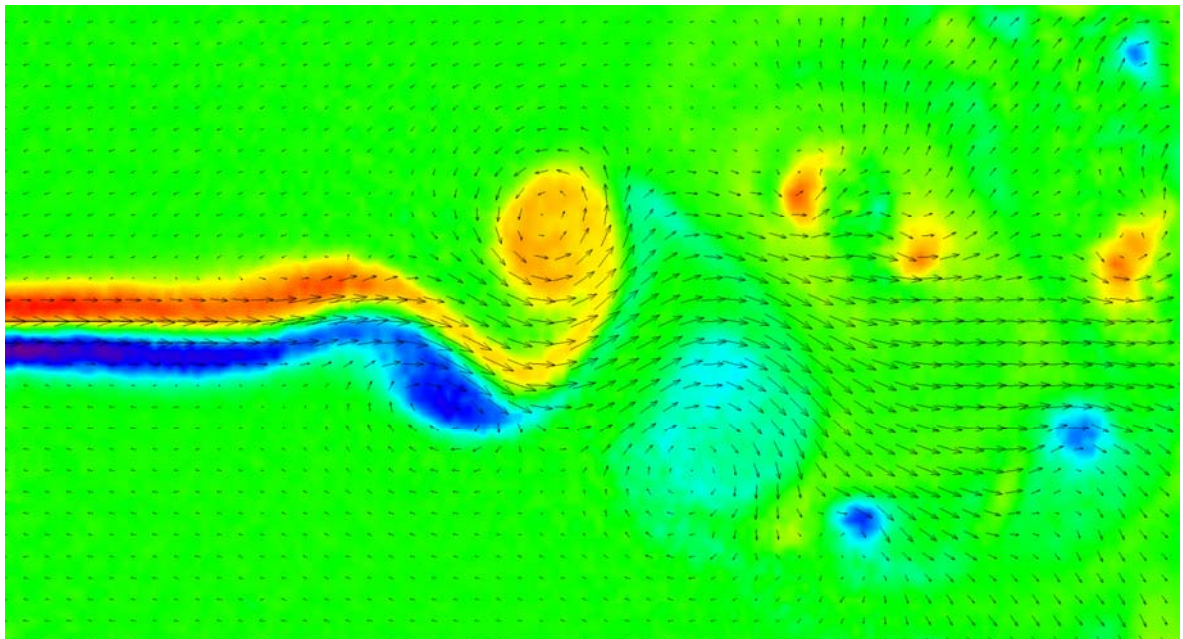


Рис. 4. Мгновенная картина поля завихренности ω_z и векторного поля скоростей для U и V компонент скорости, $F = 60$ Гц, сечение xz , $y/l = 0,5$ (разрешение снимка 53×30 мм или $2\,226 \times 1\,260$ пикс)

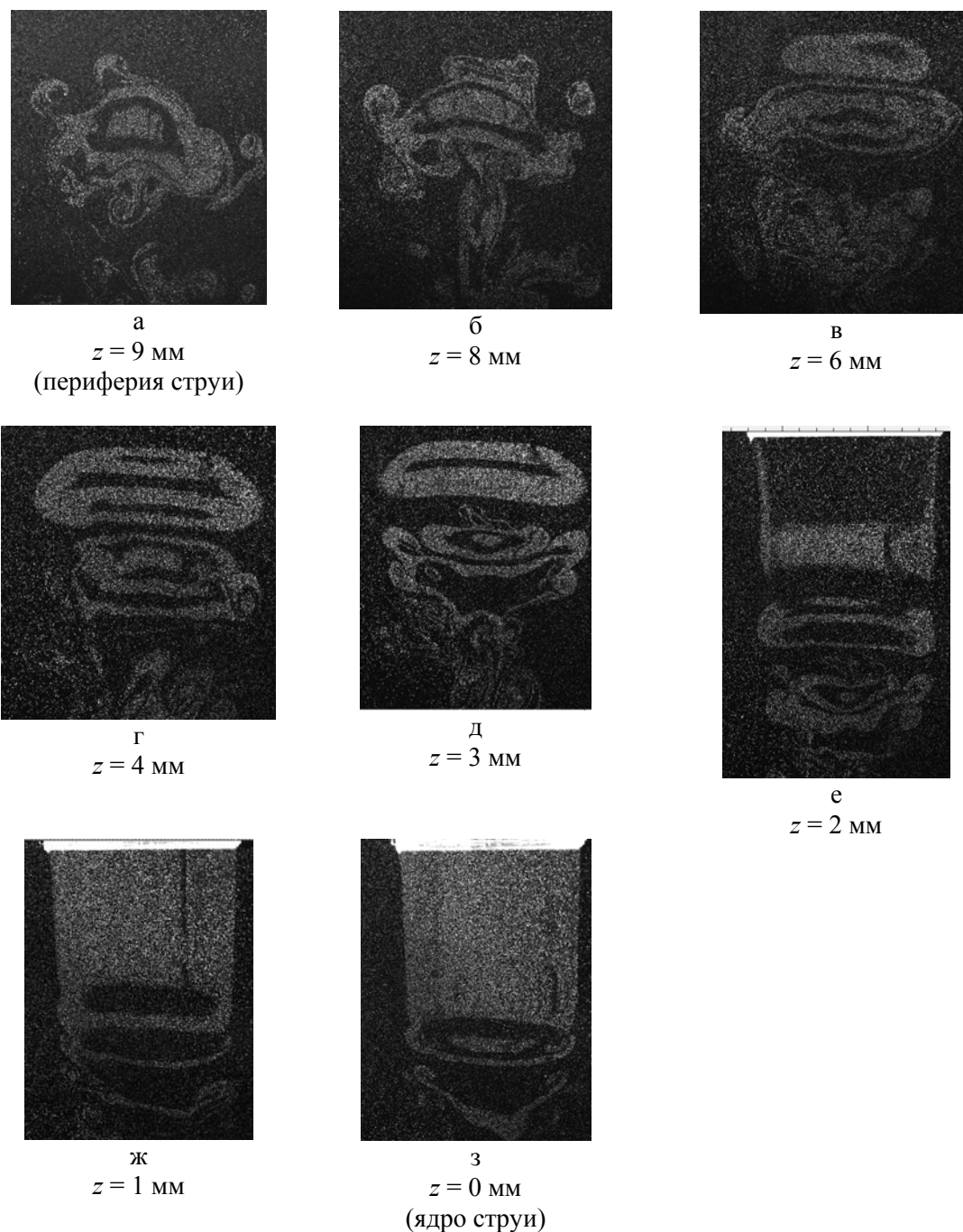


Рис. 5. PIV-образы плоской микроструи, сечение xu при различных z ($z = 0$ мм соответствует ядру струи). Направление струи сверху вниз

взаимодействие противорвращающихся вихрей, в результате, крупные вихри разрушаются, появляются несколько новых очагов завихренности.

На рис. 5 представлены PIV-образы плоской микроструи для различных z . На снимке (см. рис. 5, а) вихрь сильно искажен вторичными возмущениями. По мере продвижения в глубь струи (см. рис. 5, а–ж)

вихревая структура упорядочивается. На рис. 5, з, который соответствует ядру струи, можно наблюдать, что на начальном этапе вихрей в ядре струи нет. Вихри расположены в слоях сдвига и имеют малый диаметр, но по мере роста, появляются и в ядре. Следует отметить важную особенность, связанную с искажением вихрей на концах. На мгновенной векторной картине течения

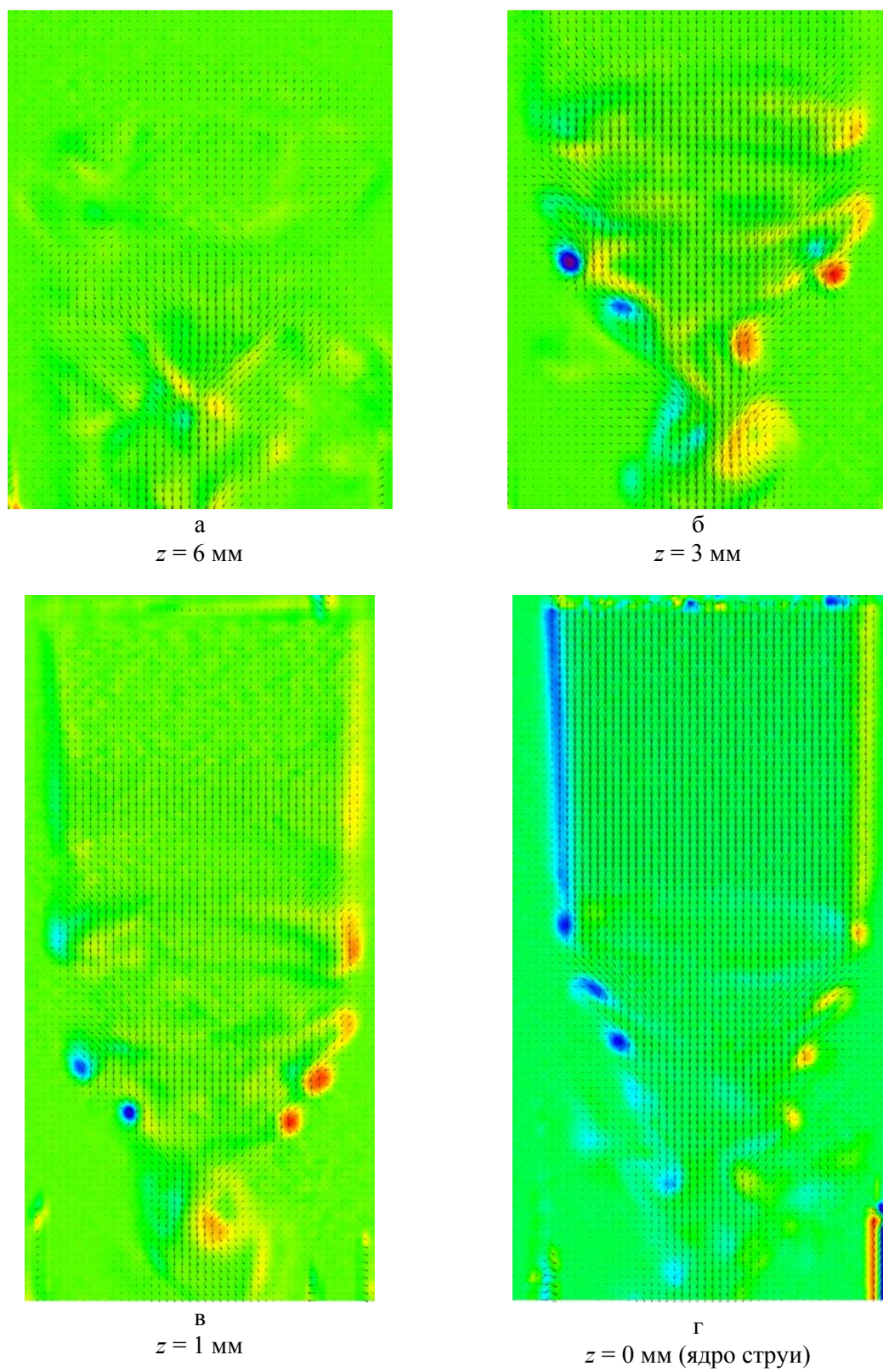


Рис. 6. Мгновенная картина поля завихренности ω_z и векторного поля скоростей для U и W компонент скорости, $F = 60$ Hz, сечения xu

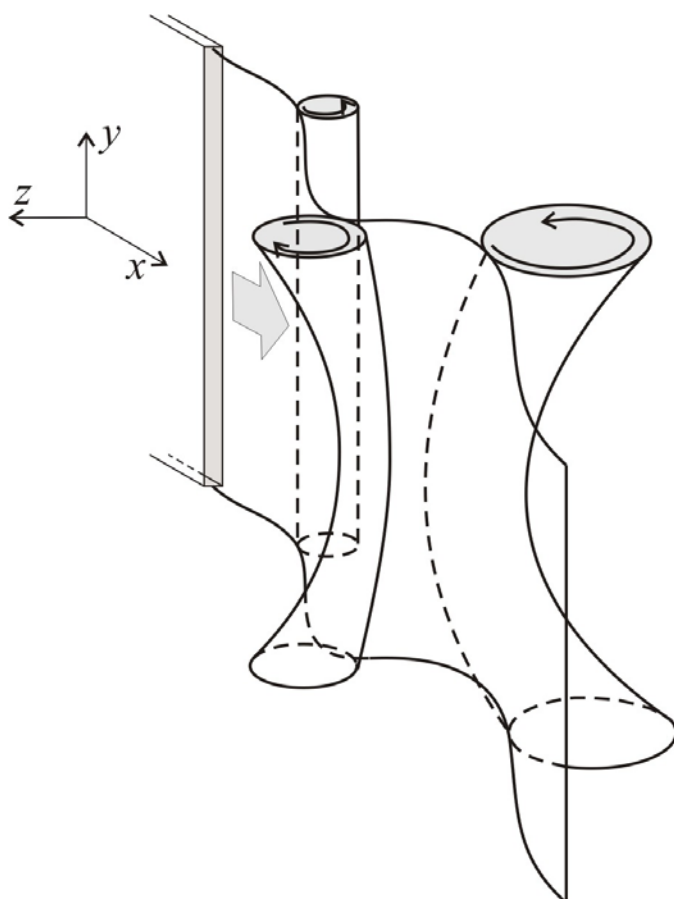


Рис. 7. Схема течения плоской микроструи при воздействии акустического поля в нормальном к плоскости струи направлении

рис. 6, в, г показано, что ниже по течению концы вихрей смещаются к центру струи, т. е. вихри сильно изгибаются.

Это связано с воздействием акустики, причем амплитуда искривления вихря наибольшая по краям. Данное явление легко понять, если представить тонкую пластину вместо струи и начать ее колебать, удерживая посередине, края пластины будут отгибаться. Аналогичное воздействие оказывает акустическое поле. Ниже по течению колебание струи настолько прогрессирует, что развитие струи в продольном направлении практически останавливается, струя рассеивается мощными искаженными вихрями и нормальными относительно большой стороны сопла колебаниями. Схематично этот процесс представлен на рис. 7. Развитие вышеупомянутых процессов также связано с удлинением струи, т. е. с соотношением длины и ширины струи. Чем меньше удлинение струи, тем менее активного искажения концов вихрей следует ожидать. Например, поведение струи с удлинением 1 при воздействии акустическим полем в нормальном к струе направлении будет идентично поведению круглой струи [5].

В данных исследованиях рассматривалась микроструя с удлинением 14. В дальнейшем авторами планируются исследования плоских микроструй различных удлинений.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований влияния акустического поля на развитие плоской микроструи методом PIV можно сделать следующие выводы.

Метод цифровой трассерной визуализации (PIV) пригоден для исследования микротечений и является одним из немногих количественных методов, применимых в экспериментах с микротечениями.

Установлено, что при воздействии акустическим полем в нормальном к плоскости струи направлении происходит расщепление струи с образованием вихревых жгутов, расположенных в синусоидальном порядке. Концы вихрей изгибаются в направлении от плоскости струи.

Показано, что акустическое воздействие в нормальном к струе направлении способствует подавлению продольной компоненты скорости и рассеянию струи.

Список литературы

1. *Carpenter J.-B., Baillot F., Blaisot J.-B., Dumouchel C.* Behavior of Cylindrical Liquid Jets Evolving in a Transverse Acoustic Field // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. No. 023601. P. 1–15.
2. *Abramov O. V., Borisov Y. Y., Oganyan R. A.* Critical Sound Pressure in the Acoustic Atomization of Liquids // *Sov. Phys. Acoust.* 1987. Vol. 33. P. 339–345.
3. *Hoover D. V., Ryan H. M., Pal S., Merkle C. L., Jacobs H. R., Santoro R. J.* Pressure Oscillation Effects on Jet Breakup // *ASME, Heat and Mass Transfer in Spray Systems HTD*. 1991. Vol. 187. P. 27–41.
4. *Heister S. D., Rutz M. W., Hilbing J. H.* Effect of Acoustic Perturbation on Liquid Jet Atomization // *J. Propul. Power*. 1997. Vol. 13. P. 82–97.
5. *Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В.* Дозвуковая круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // *Докл. Акад. наук*. 2011. Т. 436, № 1. С. 47–53.
6. *Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р.* Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // *ПМТФ*. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.
7. *Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А.* Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 1. С. 59–73.
8. *Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А.* Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 25–37.
9. *Литвиненко Ю. А., Чернорай В. Г., Козлов В. В., Лёфдаль Л., Грек Г. Р., Чун Х.* О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика*. 2004. Т. 11, № 3. С. 339–365.

Материал поступил в редколлегию 16.08.2011

Yu. A. Litvinenko, M. V. Litvinenko, M. M. Katasonov

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN ACOUSTIC FIELD INFLUENCE ON A DEVELOPMENT OF THE PLANE MICROJET BY PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)

An acoustic field influence on a development of the plane microjet at low Reynolds numbers were investigated experimentally employing Particle Image Velocimetry (PIV). Measurements were performed at synchronization of an acoustic signal phase with a laser flash. Instantaneous velocity fields of different cross- and longitudinal sections are occurred. Receptivity of the plane microjet to transversal acoustic disturbances is shown. PIV-images, correspond to them vector fields and vorticity fields are presented.

Keywords: plan microjet, Particle Image Velocimetry (PIV), instantaneous velocity fields, acoustic field.