

УДК 532.526

М. В. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко, В. В. Вихорев

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

litmar@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, vix0pb@mail.ru

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ КРУГЛОЙ СТРУИ,
СФОРМИРОВАННОЙ В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ,
С ПОМОЩЬЮ PIV-МЕТОДА***

Представлены результаты экспериментальных исследований круглой струи с вихрями Дина ($Re_d = 4\,000$, $De = 1\,673$) с использованием метода Particle Image Velocimetry (PIV). Измерения выполнены с синхронизацией фазы акустического сигнала и момента вспышки лазера. Мгновенные картины поля завихренности ω_z и векторного поля скоростей для U - и V -компоненты скорости поперечных сечений струи демонстрируют на выходе из канала вихри Дина в области низкого градиента скорости и неустойчивость Кельвина – Гельмгольца в области высоких градиентов скорости. Показано, что наличие вихрей Дина искажает двумерный кольцевой вихрь, который приобретает Ω -образную форму, причем «головка» (английский термин «vortex structure head») Ω -вихря опережает «ноги» (английский термин «vortex structure legs»), находясь в более высокоскоростной области.

Ключевые слова: круглая струя, вихри Дина, неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, Particle Image Velocimetry.

**Экспериментальная установка
и методика эксперимента**

Цель работы состояла в исследовании наличия вихревых структур в ближнем поле затопленной круглой струи, сформированной в криволинейном канале ($d = 0,02$ м, число Дина $De = 1\,673$) методом цифровой трассерной визуализации течения (англ. Particle Image Velocimetry (PIV)).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Поток воздуха на выходе круглой струи из криволинейного сопла создавался с помощью вентилятора (3), расположенного на входе в форкамеру (2), в которой были установлены хонейкомб (4) и набор детурбулизирующих сеток (5). Выход форкамеры заканчивался соплом (6),

далее шел прямолинейный участок канала (7) с удлинением $L/d = 200$, который заканчивался криволинейным насадком (8) с параметрами: угол кривизны $\alpha = 90^\circ$, диаметр $d = 0,02$ м и радиус кривизны $R_c = 0,12$ м. Дымовая визуализация течения в струе осуществлялась с помощью дымогенератора (1), установленного на входе в форкамеру. Акустическое воздействие на струю осуществлялось с помощью динамического громкоговорителя (9).

PIV-система состояла из двойного импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны излучения 532 нм. Данные исследования выполнены при задержке 150 мкс, толщина лазерного «ножа» (11) в измерительной области составляла 0,8 мм. Регистрация снимков осуществлялась цифровой камерой Ви-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-08-00201_a).

Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Вихорев В. В. Визуализация вихревых структур в ближнем поле круглой струи, сформированной в криволинейном канале, с помощью PIV-метода // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 2. С. 103–107.

деоскан 11002/П/Д-2001 с разрешением 4004×2671 пикселей (10), что соответствовало 95×63 мм. Совместно с камерой использовался объектив Sigma 105 mm F2.8 DG MACRO. Эксперименты проводились при числе Рейнольдса $Re = U_0 \times d/\nu = 4000$.

Результаты измерений

Полученные данные (рис. 2), выполненные при частоте акустического воздействия $f = 40$ Гц, демонстрируют наличие вихрей Дина на выходе из сопла вблизи стенки с меньшим радиусом закругления. Вблизи стенки с большим радиусом закругления наблюдается развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, которая проявля-

ется в этом случае в виде серпообразного вихря (рис. 2, а) или в виде двух небольших вихреобразований (рис. 2, б)

Такое изменение вида серпообразного вихря в различных поперечных сечениях говорит о том, что неустойчивость Кельвина – Гельмгольца имеет не классический кольцевой вид, а вид, близкий к Ω -образному вихрю. Причем «головка» Ω -образного вихря, находясь в высокоскоростной области, движется с большей скоростью, чем его «ноги», находящиеся в области меньшего радиуса закругления и соответственно в области с меньшей продольной скоростью. Далее вниз по потоку формируется сложное трехмерное течение с взаимодействием продольных и поперечных вихрей.

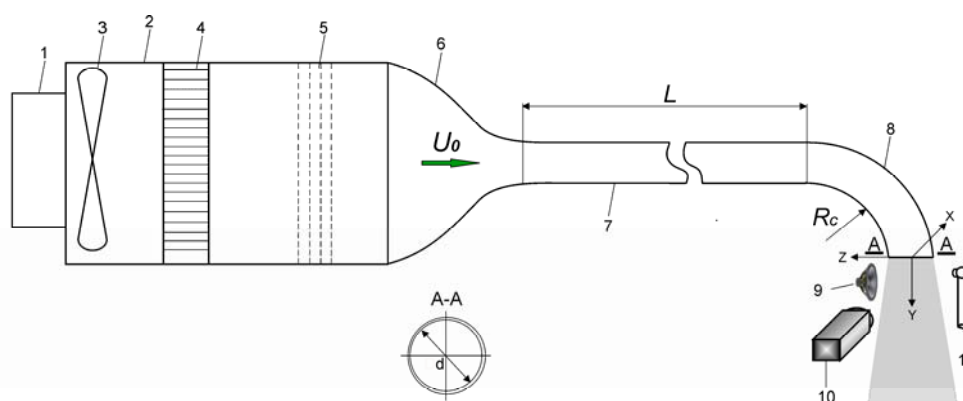


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

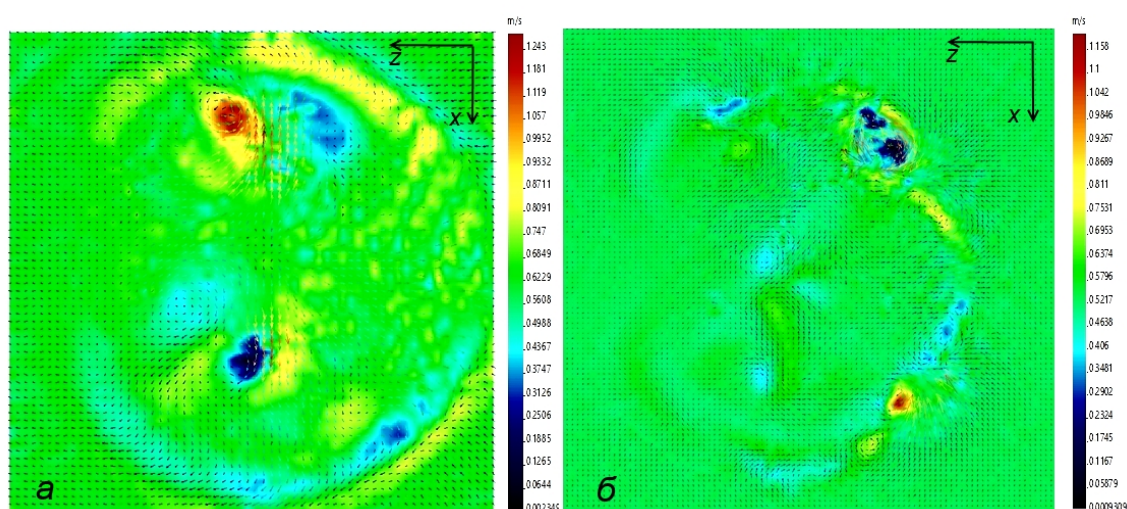


Рис. 2. Мгновенные картины поля завихренности ω_z и векторного поля скоростей для U - и V -компоненты скорости, $y/d = 0$ (а), $y/d = 1,15$ (б), $Re_d = 4000$, $f = 40$ Гц

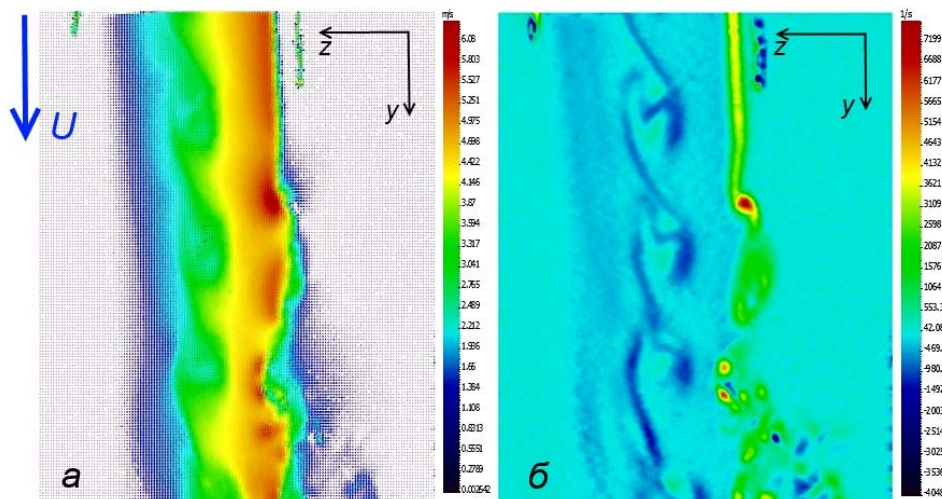


Рис. 3. Мгновенные картины поля завихренности ω_z (б) и векторного поля скоростей для U - и V -компоненты скорости (а), $x = 0$, $Re_d = 4\,000$, 2,5 калибра вниз по потоку, $f = 40$ Гц

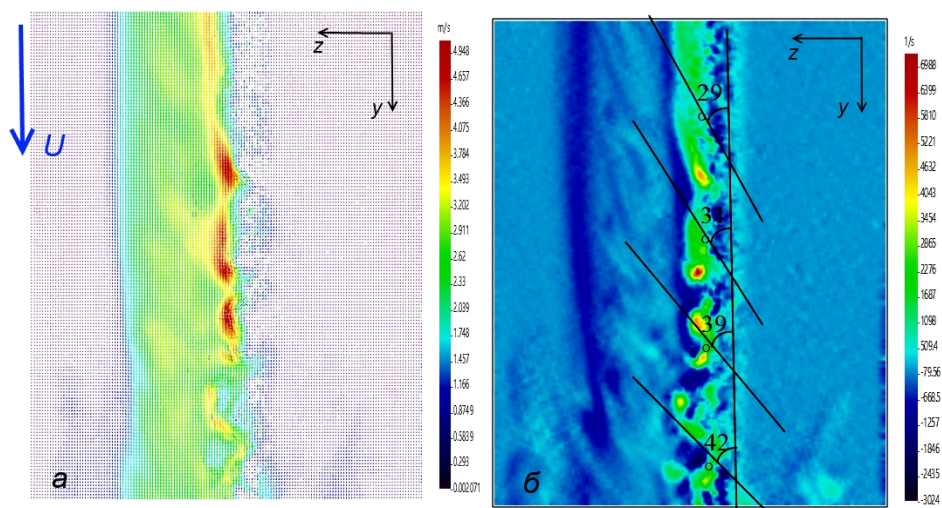


Рис. 4. Мгновенные картины поля завихренности ω_z (б) и векторного поля скоростей для U - и V -компоненты скорости (а), $x = 10$ мм, $Re_d = 4\,000$; 2,5 калибра вниз по потоку, $f = 40$ Гц

Продольное сечение струи в плоскости симметрии yz (для $x = 0$) демонстрирует наличие двух вихревых дорожек (рис. 3). Наличие вихрей Дина приводит к трансформации профиля от профиля скорости при развитом течении Пуазейля в форме параболаида вращения к сложному профилю с прогибом [1]. Данное распределение скорости полностью соответствует результатам экспериментальных и теоретических исследований ламинарного течения в криволинейных трубах [2; 3]. В этом случае в профиле скорости присутствует высокоскоростная и низкоскоростная области. Причем

высокоскоростная область имеет значительный градиент скорости как по внешней стороне, соответствующей большому радиусу закругления, так и по внутренней, расположенной вблизи оси симметрии струи. Именно в этих областях происходит развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, что подтверждают данные PIV-измерений на рис. 3.

На рис. 4, где показано сечение yz в точке $x = 5$ мм (половина диаметра сопла). По полям завихренности (ω_z) можно оценить искажение поперечных вихрей неравномерностью профиля скорости. Вниз по потоку,

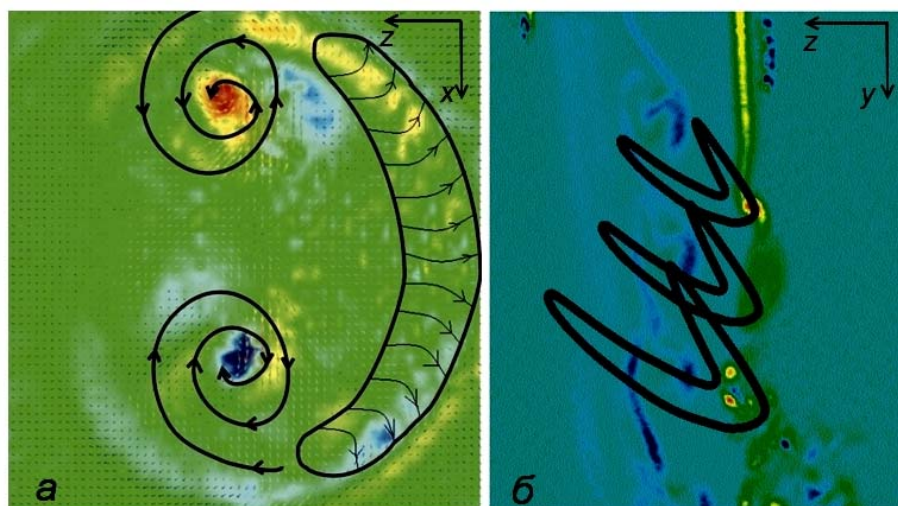


Рис. 5. Схема течения

по мере уменьшения величины продольной компоненты скорости, происходит постепенное изменение угла скоса поперечных вихрей. Например, на расстоянии 2,5 калибра угол меняется от ≈ 29 до 42° .

На рис. 5 для наглядности показана схема течения в струе, которая демонстрирует вихревые структуры в поперечном сечении струи на выходе ее из сопла (рис. 5,а) и форму вихря Кельвина – Гельмгольца в продольном сечении (рис. 5,б) развивающегося по внешней, соответствующей большему радиусу закругления, стороне струи.

Выводы

Обнаружено два вида неустойчивости на выходе круглой струи из криволинейного канала: неустойчивость, связанная с образованием вихрей Дина, в области низкого градиента скорости и неустойчивость Кельвина – Гельмгольца в области высоких градиентов скорости. Показано, что наличие вихрей Дина искажает двумерный кольцевой вихрь Кельвина – Гельмгольца, который приобретает Ω -образную форму. Причем «головка» Ω -вихря движется с большей скоростью, чем его «ноги» и тем самым растягивает вихревую структуру, находясь в более высокоскоростной области струи.

Список литературы

1. Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Вихорев В. В. Термоанемометрические исследования круглой струи, сформированной в криволинейном канале // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 1. С. 23–32.
2. Dean W. R. Note on the motion of fluid in a curved pipe // Phil. Mag. 1927. Vol. 4. P. 208–223.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. С. 584–587.

M. V. Litvinenko, Yu. A. Litvinenko, V. V. Vikhorev

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

litmar@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, vix0pb@mail.ru

**VISUALIZATION OF VORTEX STRUCTURES
IN THE NEAR FIELD OF THE ROUND JET FORMED IN CURVED CHANNEL
BY PIV-METHOD**

The results of experimental investigation of the round jet with Dean vortices ($Re_d = 4\,000$, $De = 1\,673$) using Particle Image Velocimetry are presented. The measurements were performed with synchronization the phase of acoustic signal and a laser pulse. Instant picture of vorticity field ω_z and vector velocity field for the U - and V -components of the jet cross-actions show Dean vortices near the output of the channel in the low velocity gradient field and Kelvin – Helmholtz vortices in the high-velocity gradient field. The presence of Dean vortices distorts two-dimensional vortex ring, which gets an Ω -shaped form, at that the « head» of Ω -vortex outpaces its «legs», as it is in a higher velocity area.

Keywords: free round jet, Dean vortices, Kelvin – Helmholtz instability, Particle Image Velocimetry.