

**М. В. Литвиненко<sup>1</sup>, Ю. А. Литвиненко<sup>1</sup>, Г. В. Козлов<sup>1</sup>, В. В. Вихорев<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*litmar@itam.nsc.ru; litur@itam.nsc.ru; grigoriy\_kozlov@ngs.ru; vix0pb@mail.ru*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТОПЛЕННОЙ КРУГЛОЙ СТРУИ С ВИХРЯМИ ДИНА \***

Представлены результаты экспериментальных исследований затопленной круглой струи с вихрями Дина, сформированной в криволинейном канале. Выполнены термоанемометрические измерения трехмерного профиля средней составляющей продольной компоненты скорости и получены картины поперечных и продольных сечений струи на выходе из сопла и вниз по потоку. Показаны особенности развития струи при воздействии акустического поля частотой 40 Гц.

*Ключевые слова:* затопленная круглая струя, криволинейный канал, вихри Дина, термоанемометрические измерения, дымовая визуализация, акустическое поле.

### **Введение**

Струйные течения являются предметом исследования многих научных групп в мире по причине их широкого практического применения. Вихри, образующиеся в струях, являются инструментом интенсификации теплообмена, повышения эффективности горения, снижения аэродинамического шума. Разновидностей вихрей, развивающихся в струйных течениях, большое множество и они имеют различную этиологию.

Развитие затопленной круглой струи связано со значительным поперечным градиентом скорости в области сдвигового слоя. Особенно сильный поперечный градиент скорости образуется при цилиндрическом профиле скорости на выходе из сопла. Именно в сдвиговой области происходит зарождение первичной неустойчивости – неустойчи-

вости Кельвина – Гельмгольца. Дальнейшее развитие струи характеризуется стадией линейного роста такой неустойчивости [1]. Ниже по течению, когда амплитуда колебаний становится максимальной, происходит образование кольцевых вихрей. Подобный сценарий наблюдается и при неразвитом турбулентном течении, когда сдвиговый слой турбулентный, а ядро ламинарное. Такие вихревые структуры имеют масштабы, соизмеримые с поперечным размером слоя смещения, и характеризуются достаточно большим временем существования. По мере развития вихревого кольца происходит его деформация, вследствие влияния вторичных возмущений, например таких, как неоднородность внутренней поверхности сопла или его шероховатость, неоднородность набегающего потока. Вторичные возмущения реализуются в виде продольных, вращаю-

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00201а, Гранта Президента РФ НШ-2924.2014.1

щихся в противоположных направлениях вихрей, которые взаимодействуют с вихрями Кельвина – Гельмгольца. Такие вихри исследованы в плоских слоях сдвига [2; 3] и наблюдались в круглых водяных струях [4]. Они могут быть генерированы различными способами: например, при помощи лепесткового сопла [5; 6], шевронов [7] или шероховатостей [8], расположенных на кромке сопла. С точки зрения качества смешения взаимодействие вихрей Кельвина – Гельмгольца с продольными вихрями является эффективным механизмом смешения струи с окружающим газом.

Создание параболического профиля скорости (профиля Пуазеля) на срезе сопла приводит к ситуации, когда течение в струе (круглой затопленной) остается ламинарным на расстоянии до десяти калибров, отсутствуют кольцевые вихри Кельвина – Гельмгольца и продольные вихри [9; 10]. Если на канал, в котором развивается течение Хагена – Пуазеля установить криволинейный насадок, то мы получим принципиально новое течение на выходе из сопла. Известно, что в криволинейных трубах под действием центробежной силы, создается условие формирования вторичного течения, которое проявляется в виде двух противорвращающихся вихрей, названных вихрями Дина – по фамилии британского ученого, впервые исследовавшего их теоретически [11; 12]. Зарождение вихрей внутри криволинейного канала можно использовать для увеличения тепломассопереноса струи с окружающим газом.

В работах [11; 12] автор первым предложил теоретическое решение движения жидкости через криволинейные трубы для ламинарного потока и ввел параметр  $K$ , определяющий влияние кривизны трубы:

$$K = 2 \operatorname{Re}_R^2 (R/R_c),$$

где  $R$  – радиус трубы;  $R_c$  – радиус кривизны, что справедливо для малых отношений кривизны  $R/R_c$ . В работе [13] использовалось другое соотношение между скоростью потока и кривизны трубы, которое было связано с переменной  $K$  из работ [11; 12] как  $D = 4\sqrt{K}$ . Это соотношение впоследствии получило название числа Дина. По результатам этой работы диапазон чисел Дина, при которых вторичное течение в виде двух противорвращающихся вихрей становится определяющим, расширился до значения

$D = 600$ . Позже автор работы [14], используя метод конечных разностей, обнаружил, что в диапазоне  $10 \leq D \leq 5000$  физические явления, наблюдаемые в работе [13], сохраняются.

В экспериментальной работе [15] показано, что теория, предложенная W. R. Dean [11], справедлива для труб различной кривизны. Автор показал, что ламинарное течение в криволинейных трубах реализуется при бóльших числах Рейнольдса, чем для прямых труб, несмотря на то, что кривизна вызывает неустойчивость течения. В работах [16; 17] показано, что даже небольшая кривизна влияет на течение жидкости через трубу. В [17] также подтверждено существование завихренности при помощи визуализации течения и отмечено, что поток устойчив до определенной скорости, при которой подкрашенная струйка, используемая для визуализации линий тока, начинает вибрировать в хаотичном порядке, что усиливается с увеличением скорости, вплоть до турбулизации потока.

Анализируя результаты по исследованию течений в криволинейных каналах и вихревые структуры в затопленных струях, можно сделать вывод, что, объединяя два случая – криволинейный канал и затопленную струю, можно предположить, что в такой струе на выходе из сопла будут наблюдаться вихри Дина, которые будут иметь свои особенности развития.

Ниже авторами представлены результаты экспериментальных исследований ламинарной круглой струи, сформированной на выходе из криволинейного канала, в котором возникают вихри Дина.

### Условия и методика эксперимента

Эксперименты проводились на струйной установке в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск), которая схематично представлена на рис. 1. Основой установки является классический сопловой аппарат, выполненный по схеме сопла Витошинского с хонейкомбом и набором детурбулизирующих сеток в форкамере (1). К выходу сопла стыковалась трубка (2) длиной 4 м с внутренним диаметром, равным диаметру выходного отверстия сопла ( $d = 0,02$  м). Такое удлинение ( $l/d = 200$ ) позволяет сформировать параболический про-

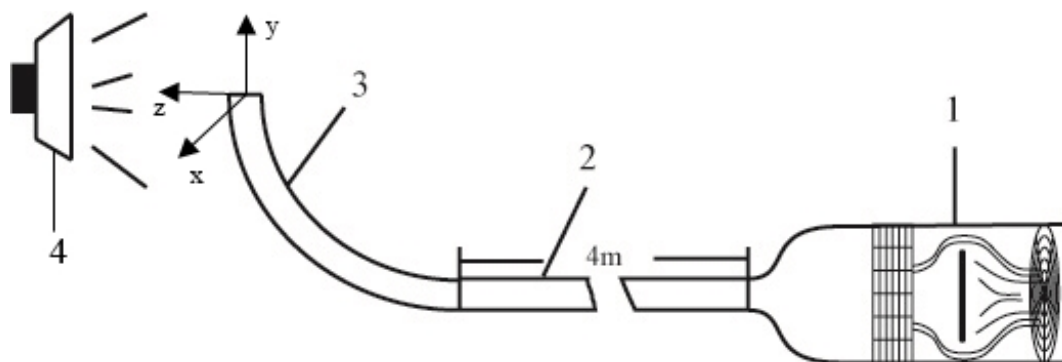


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – форкамера; 2 – удлинительная трубка; 3 – криволинейный насадок; 4 – громкоговоритель



Рис. 2. Картина дымовой визуализации струи вдоль потока, скорость потока на оси струи,  $U_0 = 3$  м/с ( $Re_R = U_0 \times R / \nu = 2000$ )

филь скорости течения в канале, типичный для течения Хагена – Пуазейля [17]. На прямой участок трубы устанавливался криволинейный насадок (3) с параметрами: угол кривизны  $\alpha = 90^\circ$ , диаметр  $d = 0,02$  м, радиус кривизны  $R_c = 0,12$  м, в котором развивались вихри Дина.

Воздух нагнетался в канал струйной установки при помощи вентилятора, помещенного в форкамеру (1). Эксперименты проводились при числе Рейнольдса

$$Re_R = U_0 \frac{R}{\nu} = 2000,$$

рассчитанном по скорости невозмущенного потока на входе в криволинейный участок сопла (3),  $U_0 = 3$  м/с и его радиусу,  $R = 0,01$  м.

Дымовая визуализация течения выполнена с помощью подачи в струйную установку со стороны вентилятора дыма, генерируемого дымовым генератором промышленного производства. Картины дымовой визуализации фиксировались цифровой видеокамерой

с частотой 25 кадр/с. С помощью подсветки лазерным ножом (толщина 500 мкм) были получены как картины течения в продольных и поперечных сечениях, так и виды в плане.

Акустическое воздействие на струю осуществлялось с помощью динамического громкоговорителя (4), на который от звукового генератора подавался синусоидальный сигнал различной частоты и амплитуды.

В ходе эксперимента была проведена серия термоанемометрических измерений и получен профиль средней скорости потока на выходе из сопла. Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости  $U_0$ . Датчик термоанемометра имел нить из золоченого вольфрама длиной 1 мм и диаметром 5 мкм с коэффициентом перегрева 1,8 и калибровался в свободном потоке. Максимальная ошибка при калибровке датчика не превышала 1 % от  $U_0$ . Сигнал с датчика, проходя через термоанемометр, подавался на аналого-цифрой

вой преобразователь и далее в компьютер, где данные измерений накапливались в памяти, затем производилась обработка данных в пакете Matlab.

### Результаты эксперимента

Как известно [18], для формирования двухвихревого вторичного течения в криволинейном канале необходимо реализовать профиль Пуазеля на входе в изгиб. Из исследований, проводимых ранее по влиянию распределения средней составляющей скорости на развитие струи [19], известно, что для развития параболического профиля скорости течения в канале, типичного для течения Хагена – Пуазейля, необходим канал с удлинением  $l/d = 200$  (где  $d$  – диаметр струи,  $d = 0,02$  м,  $l$  – длина канала,  $l = 4$  м). Развитие такой струи происходит без образования каких-либо вихревых структур – кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца, продольных вихревых структур – до десяти калибров вниз по течению (рис. 2). Профиль средней скорости в поперечном сечении струи имеет параболическую форму и представляет собой сплошной сдвиговый слой (рис. 3, а). Максимальный уровень пульсаций скорости (рис. 3, б) наблюдается в области сдвигового слоя струи и составляет порядка  $0,25\% U_0$  вблизи сопла и возрастает до  $1,2\% U_0$  вниз по потоку. В области ядра струи величина пульсаций скорости значительно ниже и составляет, примерно,  $0,4\% U_0$  во всем диапазоне измерений вниз по потоку.

Как было сказано, устанавливая криволинейный насадок, мы получаем принципиально новое течение на выходе из сопла. Параметром, определяющим влияние кривизны трубы, при ламинарном течении является число Дина [18], которое в нашем случае составляло

$$De = Re_R \sqrt{R/R_c} = 3\,264,$$

где  $R$  – радиус трубы,  $R_c$  – радиус кривизны трубы. Из теоретической работы [14] известно, что в диапазоне чисел Дина

$$10 \leq De \leq 5\,000$$

вторичное течение, образующееся внутри криволинейного канала, представляет собой два противовращающихся вихря. Кроме того, был выполнен предварительный расчет течения для таких параметров криволинейного канала в программном комплексе *Ansys*

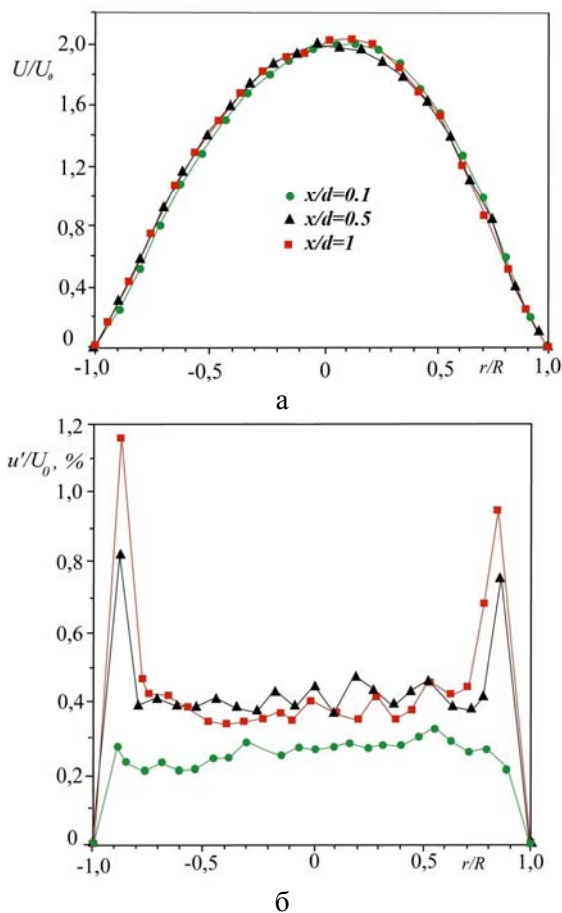


Рис. 3. Распределения средней (а) и пульсационной (б) составляющих скорости в поперечном сечении струи на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала ( $x/d = 0,1, 0,5, 1$ ); скорость потока  $U_0 = 3$  м/с ( $Re_R = U_0 \times R/\nu = 2\,000$ )

*Fluent*. Расчет проводился в трехмерной постановке для модели аналогичной геометрии. Общее количество ячеек расчетной сетки составило 4 млн. Показатели качества сетки Minimum Orthogonal Quality =  $3,41947e - 01$ , Maximum Aspect Ratio =  $4,03741e + 01$ . В качестве граничных условий на входе задавался профиль скорости в виде параболоида (значение скорости соответствовало экспериментальному). Представленные в работе результаты численного интегрирования в пакете *Ansys Fluent* получены для стационарного случая и первого порядка точности. На рис. 4 представлено продольное сечение участка трубы и серия поперечных сечений  $xz$  для различных координат по оси  $y$ . Результаты расчета показали наличие вихревого течения с делением вихрей внутри криволинейного канала (см. рис. 4). Область максимальной скорости сме-

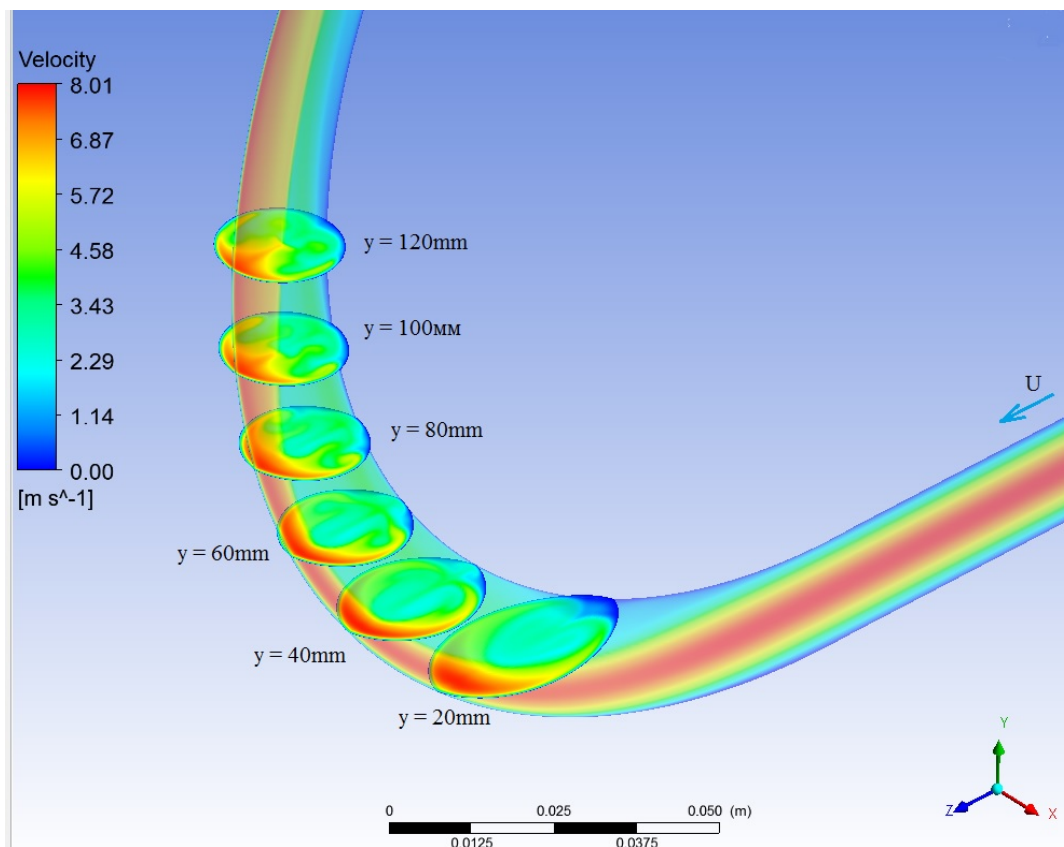


Рис. 4. Поле скоростей в криволинейном канале по результатам моделирования в пакете Fluent

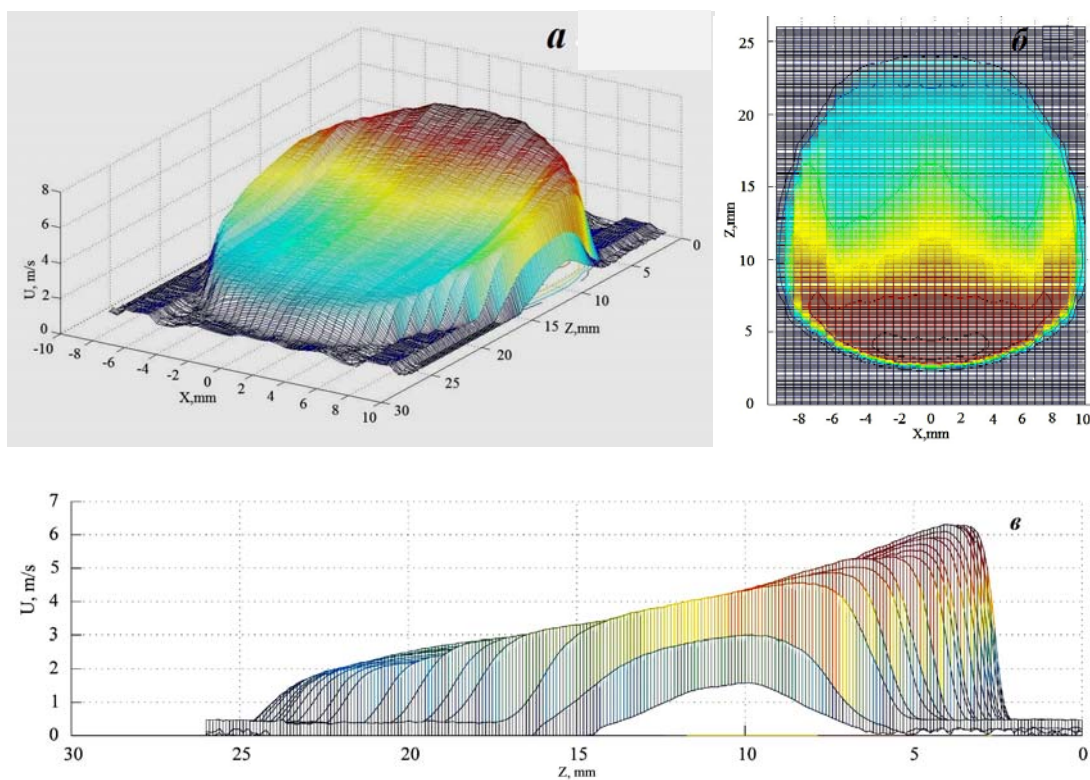


Рис. 5. Трехмерное распределение средней скорости на выходе из сопла (криволинейного канала) в разных проекциях при  $Re_R = 2000$

щается с оси канала к стенке с большим радиусом скругления. При достижении сечения  $y = 60$  мм, что соответствует повороту струи на  $45^\circ$ , реализуется развитое вихревое течение. В отличие от эксперимента в расчете не удалось получить течение с парой противовращающихся вихрей, при одинаковых параметрах эксперимента и расчета. Как только вихри замыкались, происходило деление вихря и образование еще одной вихревой пары.

Профиль средней скорости, полученный в эксперименте, представлен на рис. 5 в разных проекциях. Как видно, течение на выходе из криволинейного канала становится существенно трехмерным, положение максимума продольной компоненты скорости смещается к стенке канала с большим радиусом скругления. По распределению поля скорости продольной компоненты можно сделать вывод о наличии в течении двух противовращающихся вихрей (вихрей Дина). Возникновение таких вихрей типично для изогнутых, скругленных каналов и объясняется воздействием центробежной силы на поле скорости. До момента воздействия центробежной силы, т. е. до начала криволинейного участка, профиль скорости представлял собой параболоид. Предваритель-

ный анализ литературы по исследованию вихрей Дина показал, что большинство работ направлены на изучение зарождения и развития вихрей Дина непосредственно в канале, и вопрос их развития при выходе из канала практически не рассматривался. Между тем именно на выходе из канала течение трансформировано вихрями, в то же время остается когерентным до 5–7 калибров ниже по течению.

На рис. 6 представлена схема течения в криволинейном канале (из работы [18]) и показаны картины дымовой визуализации поперечного сечения круглой струи непосредственно на срезе выходного отверстия криволинейного канала (рис. 6, а) и на различных расстояниях вниз по потоку (рис. 6, б–д), полученные в ходе эксперимента. На рис. 6, а видны две области внутри струи, которые, по-видимому, и представляют собой два противовращающихся вихря Дина. По мере развития струи вниз по потоку можно наблюдать выбросы как результат взаимодействия двух противовращающихся вихрей (см. рис. 6, б–д). Направление выбросов ориентировано по координате  $z$  в обе стороны. Выброс в направлении отрицательных  $z$  наиболее интенсивный и является восприимчивым к акустическим колебани-

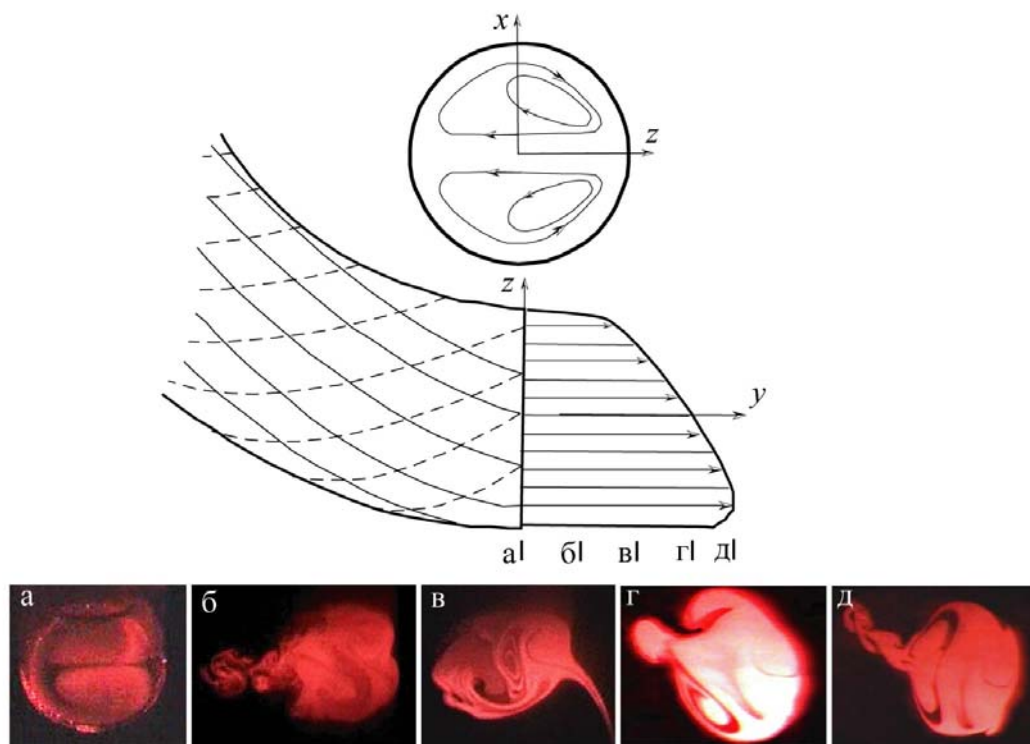


Рис. 6. Схема течения в криволинейном канале из работы [18], дымовая визуализация поперечных сечений струи в плоскости  $xz$  в различных координатах по оси  $y$  (вниз по течению)

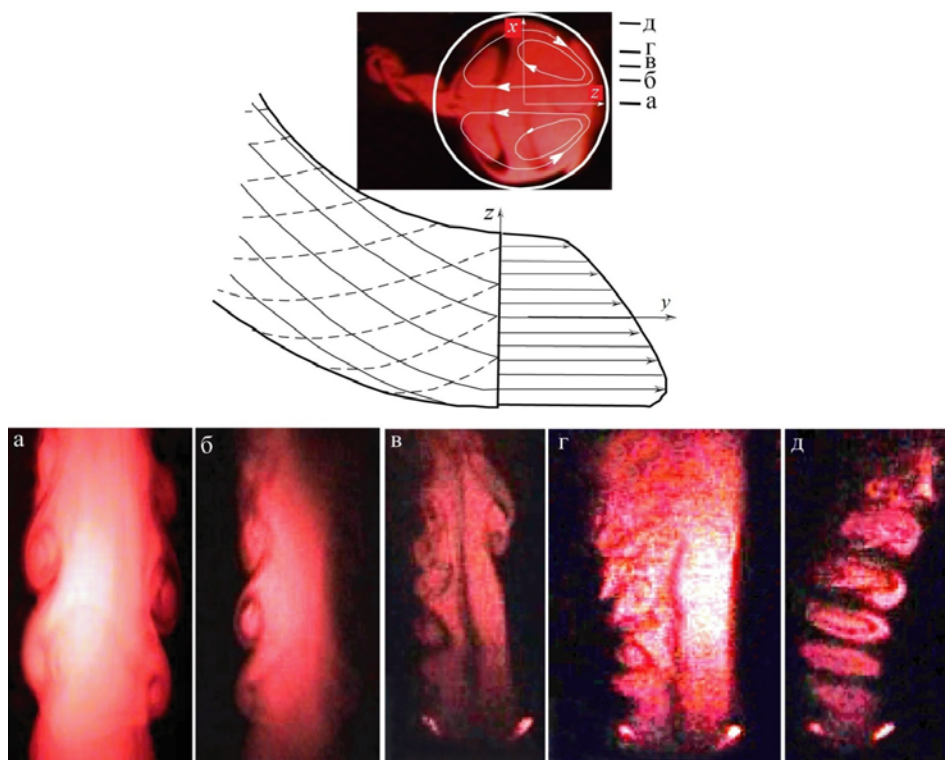


Рис. 7. Дымовая визуализация продольных сечений струи в плоскости  $xy$  в различных координатах по оси  $z$  при частоте акустического поля  $F = 40$  Гц

ям, в отличие от выброса в положительном направлении  $z$ . Следует отметить, что при передвижении лазерным ножом по направлению координаты  $y$  происходит смена фазы возмущения, поэтому картины на рис. 6 представляют различные фазы возмущения для одного периода.

В дальнейшем развитии струи прослеживается та же тенденция с развитием выбросов. Причем на выбросе по отрицательному направлению  $z$  возникает вторичное колебание. Необходимо отметить, что когерентность данных структур сохраняется до нескольких калибров ниже по течению.

Как было показано, течение с вихрями Дина восприимчиво к акустическому воздействию, в частности, происходит модуляция течения частотой наложенного поля. На рис. 7 показаны мгновенные картины визуализации дымом продольных сечений круглой струи в плоскости  $xy$  для различных координат по оси  $z$  при частоте акустического воздействия  $F = 40$  Гц.

### Выводы

По результатам экспериментальных исследований свободной круглой струи с вих-

рями Дина, сформированной в криволинейном канале, можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что на выходе из криволинейного канала сохраняется двухвихревое вторичное течение, которое остается когерентным до 5–7 калибров ниже по течению.

2. Показано, что затопленная круглая струя с вихрями Дина восприимчива к акустическому воздействию, в частности, происходит модуляция течения частотой наложенного поля.

3. Установлено, что в результате развития круглой струи с вихрями Дина возникает два выброса разной интенсивности и восприимчивости к акустическим колебаниям.

### Список литературы

1. *Drazin P. G., Reid W. H.* Hydrodynamic Stability. Cambridge Univ. Press, 1981.
2. *Bernal L. P., Roshko A.* Streamwise Vortex Structure in Plane Mixing Layers // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 170. P. 499–519.
3. *Lasheras J. C., Cho J. S., Maxworthy T.* On the Origin and Evolution of Streamwise Vortical Structures in Plane Free Shear Layer // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 172. P. 231–247.

4. *Liepmann D., Gharib M.* The Role of Streamwise Vorticity in the Near-Field of Round Jet // *J. Fluid Mech.* 1992. Vol. 245. P. 643–668.
5. *Zaman K. B. M. Q.* Axis Switching and Spreading of an Jet: The Role of Coherent Structure Dynamics // *J. Fluid Mech.* 1997. Vol. 316. P. 1–20.
6. *McCormic D. C., Bennett J. C.* Vortical and Turbulent Structure of a lobed Mixer Free Shear Layer // *AIAA Journal.* 1994. Vol. 32. P. 1852–1856.
7. *Callender B., Gutmark E., Martens S.* Near-Field Investigation of Chevron Nozzle Mechanisms // *AIAA Journal.* 2008. Vol. 46. No. 1. P. 36–45.
8. *Grek G. R., Kozlov G. V., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Litvinenko M. V.* Round Jet in the Cross Shear Flow // *Visualization of Mechanical Processes.* 2012. Vol. 2. Iss. 4. P. 29.
9. *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. P. 59–73.
10. *Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А.* Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // *Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика.* 2009. Т. 4, № 1. С. 14–24.
11. *Dean W. R.* Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe // *Phil. Mag.* 1927. Vol. 4. P. 208–223.
12. *Dean W. R.* The Stream-Line Motion of Fluid in a Curved Pipe // *Phil. Mag.* 1928. Vol. 5. P. 671–695.
13. *McConalogue D. J., Srivastava R. S.* Motion of a Fluid in a Curved Tube // *Proc. Roy. Soc.* 1968. Vol. 307. P. 37–53.
14. *Greenspan D.* Secondary Flow in a Curved Tube // *J. Fluid Mech.* 1973. Vol. 57. P. 167–176.
15. *White C. M.* Streamline Flow through Curved Pipes // *Proc. Roy. Soc.* 1929. Vol. 123. P. 645–663.
16. *Eustice J.* Flow of Water in Curved Pipes // *Proc. Roy. Soc.* 1910. Vol. 84. P. 107–118.
17. *Taylor G. I.* The Criterion for Turbulence in Curved Pipes // *Proc. Roy. Soc.* 1929. Vol. 124. P. 243–249.
18. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
19. *Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov G. V., Sorokin A. M., Litvinenko M. V.* Development of a Free Round Jet at Different Conditions at the Nozzle Exit under an Acoustic Action // *Progress in Flight Physics.* 2012. Vol. 3. P. 429–448.

Материал поступил в редколлегию 21.05.2014

**M. V. Litvinenko, Yu. A. Litvinenko, G. V. Kozlov, V. V. Vikhorev**

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

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*litmar@itam.nsc.ru; litur@itam.nsc.ru; grigoriy\_kozlov@ngs.ru; vix0pb@mail.ru*

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A FREE ROUND JET WITH DEAN VORTICES**

Results of the experimental investigations of free round jet with Dean vortices formed in curved channel are presented. Hot-wire anemometry measurements of three-dimensional mean velocity profile were performed, smoke visualization pictures cross and longitudinal sections at nozzle exit and downstream were obtained. The features of jet development at acoustic excitation of 40 Hz are shown.

*Keywords:* free round jet, curved channel, Dean vortices, hot-wire anemometry, smoke visualization, acoustic field.