

М. В. Литвиненко¹, Ю. А. Литвиненко¹, В. В. Вихорев²

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*

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

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУГЛОЙ СТРУИ, СФОРМИРОВАННОЙ В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ *

Представлены результаты экспериментальных исследований затопленной круглой струи, сформированной в криволинейном канале. Выполнены термоанемометрические измерения трехмерного профиля средней и пульсационной составляющих продольной компоненты скорости на выходе из сопла и ниже по течению. Показано влияние вихрей Дина на развитие струи. Анализируются частотные спектры пульсаций для некоторых поперечных сечений. Показана восприимчивость струи к низкочастотной части спектра.

Ключевые слова: круглая струя, криволинейный канал, термоанемометрические измерения, спектр пульсаций.

Введение

Если рассматривать течения, наиболее часто встречающиеся на практике, то течение в изогнутом канале является одним из них. Особенность таких течений – возникновение завихренности, обусловленной центробежными силами, которые генерируют вторичное течение и перераспределение продольной составляющей скорости.

Если на канал, в котором развивается течение Хагена – Пуазейля, 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 противовращающихся вихрей, названных вихрями Дина по фамилии британского ученого, впервые исследовавшего их теоре-

тически [1; 2]. Зарождение таких вихрей внутри криволинейного канала можно использовать для увеличения тепломассопереноса струи с окружающим газом.

В работах [1; 2] автор первым предложил теоретическое решение движения жидкости через криволинейные трубы для ламинарного потока и ввел параметр K , определяющий влияние кривизны трубы: $K = 2 \text{Re}_R^2 (R/R_c)$, где R – радиус трубы; R_c – радиус кривизны, что справедливо для малых отношений кривизны R/R_c . В работе [3] использовалось другое соотношение между скоростью потока и кривизны трубы, которое было связано с переменной K из работ [1; 2] 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 противовращающихся вихрей становится

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты № 14-08-00201а, 14-08-31166).

определяющим, расширился до значения $D = 600$. Позже автор работы [4], используя метод конечных разностей, обнаружил, что в диапазоне $10 \leq D \leq 5000$ физические явления, наблюдаемые в работе [3], сохраняются.

В экспериментальной работе [5] показано, что теория, предложенная У. Р. Дином [1], справедлива для труб различной кривизны. Автор показал, что ламинарное течение в криволинейных трубах реализуется при больших числах Рейнольдса, чем для прямых труб, несмотря на то, что кривизна вызывает неустойчивость течения. В работах [6; 7] показано, что даже небольшая кривизна влияет на течение жидкости через трубу. В [8] 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 хаотично вибрировать, что усиливается с увеличением скорости, вплоть до турбулизации потока.

По результатам исследований, объединяя два случая – криволинейный канал и затопленную струю, можно предположить, что в такой струе на выходе из сопла будут наблюдаться вихри Дина, имеющие особенности развития.

Ниже авторами представлены результаты экспериментальных исследований ламинарной круглой струи, сформированной на вы-

ходе из криволинейного канала, в котором возникают вихри Дина.

Условия и методика термоанемометрических измерений

Экспериментальные исследования проводились на струйной установке в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Схема установки представлена на рис. 1. Основой струйной установки является классический сопловой аппарат, выполненный по схеме сопла Витошинского с хонейкомбом и набором детурбулизирующих сеток в форкамере. К выходу сопла стыковалась трубка с прямым участком длиной 4000 мм с внутренним диаметром, равным диаметру выходного отверстия сопла Витошинского ($d = 20$ мм). Получающееся удлинение ($l/d = 200$) позволяет сформировать параболический профиль скорости течения в канале [9], типичный для течения Хагена – Пуазейля, необходимый для реализации вторичного течения в виде вихрей Дина.

Прямолинейный участок трубы заканчивался поворотным коленом (с параметрами: угол кривизны $\alpha = 90^\circ$, диаметр $d = 20$ мм, радиус кривизны $R_c = 120$ мм), в котором формировались вихри Дина (число Дина $De = 952$). Воздух нагнетался в канал струйной установки при помощи вентилятора, установленного в форкамере, скорость на

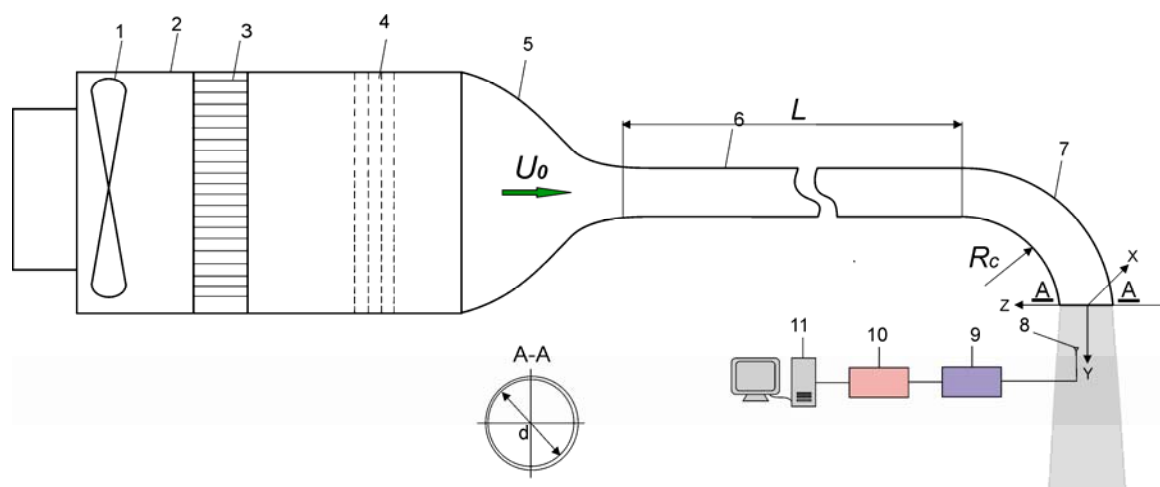


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – вентилятор; 2 – форкамера; 3 – хонейкомб; 4 – набор детурбулизирующих сеток; 5 – сопло Витошинского; 6 – прямолинейный канал ($L = 4000$ мм); 7 – криволинейный участок канала ($R_c = 120$ мм, $\alpha = 90$); 8 – датчик термоанемометра; 9 – термоанемометр; 10 – АЦП; 11 – ПК

выходе из сопла измерялась электронным манометром. Эксперименты проводились при числе Рейнольдса $Re_R = U_0 \cdot R / \nu = 3300$, рассчитанном по скорости невозмущенного потока на входе в криволинейный участок сопла, $U_0 = 5$ м/с, и его радиусу, $R = 10$ мм.

Измерения в струе проведены с помощью термоанемометра постоянного сопротивления фирмы DISA. В ходе измерений регистрировалась средняя скорость в исследуемой точке поля потока U и продольная компонента пульсаций скорости u' . Датчик с чувствительным элементом из нити Волластона длиной 1 мм и диаметром 5 нм, с коэффициентом перегрева 1,8 калибровался в свободном потоке. Перемещение датчика термоанемометра осуществлялось при помощи автоматического координатного устройства по двум координатным осям x и z с шагом 1 мм. Точность позиционирования датчика по обеим осям автоматически корректировалась по электромагнитным линейкам и составляла ± 5 нм. Сигнал с датчика термоанемометра подавался на термоанемометр постоянного сопротивления, затем на аналого-цифровой преобразователь и далее в компьютер, где сохранялся.

Результаты термоанемометрических измерений

Термоанемометрические измерения профилей средней и пульсационной составляющих скорости выполнены на различных расстояниях от среза сопла: $y/d = 0,0575; 0,5; 1; 2; 3$ (рис. 2–6), где y – продольная координата, d – диаметр сопла ($d = 20$ мм).

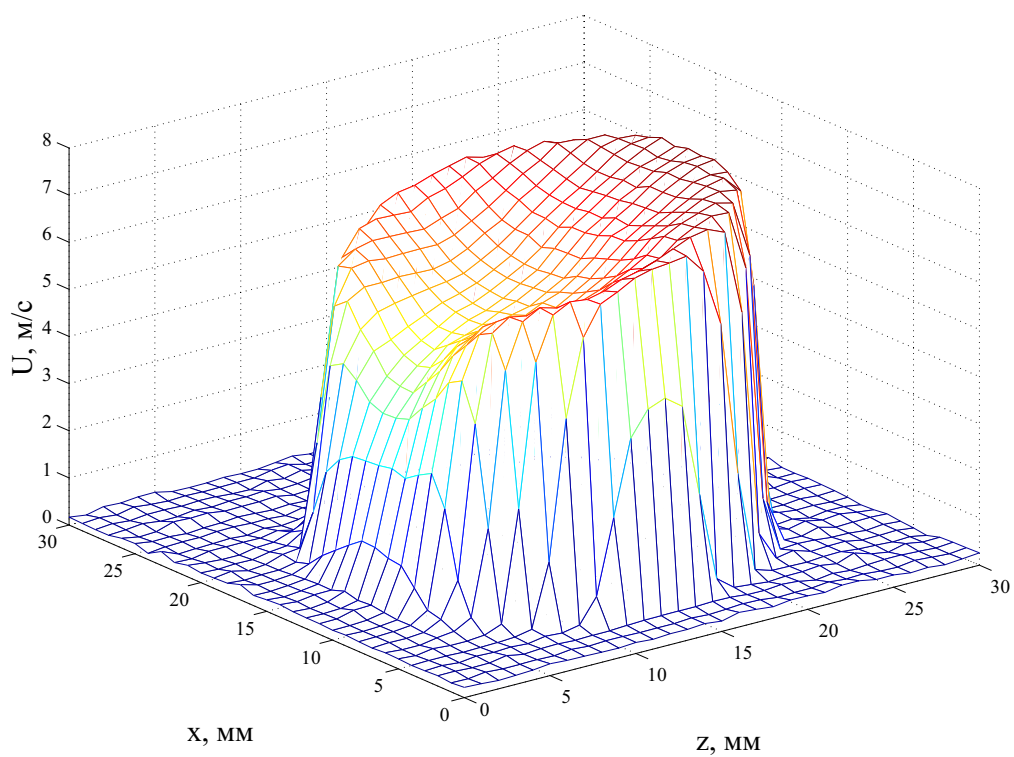
Как видно, течение на выходе из криволинейного канала существенно трехмерное (см. рис. 2, а), положение максимума продольной компоненты скорости смещено к стенке канала с большим радиусом скругления. Данное распределение скорости полностью соответствует результатам экспериментальных и теоретических исследований ламинарного течения в криволинейных трубах. Именно такое распределение скорости способствует возникновению в криволинейном канале двух противовращающихся вихрей – вихрей Дина. Следует отметить, что на выходе круглой струи из прямолинейного канала (с удлинением $l/d = 200$) при отсутствии поворотного колена формируется параболический профиль скорости. Наличие

такого профиля приводит к ряду принципиальных изменений в структуре и характеристиках развития круглой струи по сравнению с характеристиками развития круглой струи с П-образным (английский термин *top-hat*) профилем скорости на срезе сопла [9]. Одним из таких различий является исчезновение кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца в струе с параболическим профилем скорости. Однако появление на выходе прямолинейного канала криволинейного участка трубы приводит к кардинальному изменению распределения скорости на выходе струи из сопла. Кроме того, что оно становится асимметричным, можно отметить появление узкой области сильного градиента скорости на периферии струи, что характерно для ударного профиля скорости (см. рис. 2, а). Возникновение в данной ситуации неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в области высокого градиента скорости (вблизи стенки с большим радиусом скругления) становится очевидным. Но также очевидно, что наличие вихрей Дина в струе исказит классический кольцевой вихрь. Ниже по потоку (см. рис. 4, а, 5, а, 6, а) происходит утолщение сдвигового слоя.

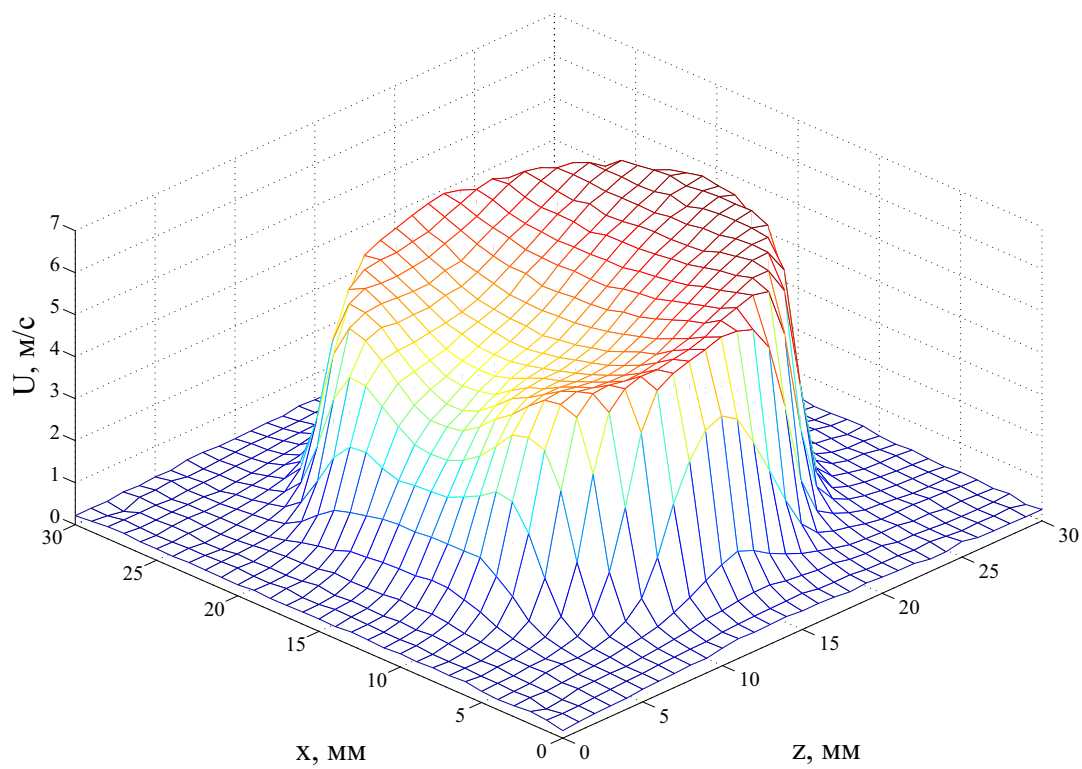
На представленных профилях пульсаций скорости (см. рис. 2, б, 3, б, 4, б, 5, б, 6, б) в области сдвигового слоя наблюдается максимальный уровень пульсаций, что говорит о развитии в нем возмущений. В то же время сказывается влияние вихрей Дина, которые, искажая распределение скорости, приводят к образованию сегмента с пониженным уровнем пульсаций. Такая картина прослеживается во всех измеренных сечениях. Объясняется это пониженным градиентом скорости в слое сдвига в том же сегменте. В целом профили скорости отображают влияние завихренности (вихрей Дина) на среднее течение.

На рис. 7 представлены частотные спектры пульсаций для фиксированных сечений y ($y/d = 0,0575; 0,5; 1; 2; 3$; справа показан уровень амплитуды частоты), расположенных в плоскости симметрии струи, пересекающих области низкого и высокого градиента скорости.

По результатам видно, что высокий уровень пульсаций (до 8 % от U_0) наблюдается в низкочастотной области и локализуется непосредственно в слоях сдвига. По мере удаления от сопла вниз по течению (до $y/d \approx 2,5$) заполняется более высокая область

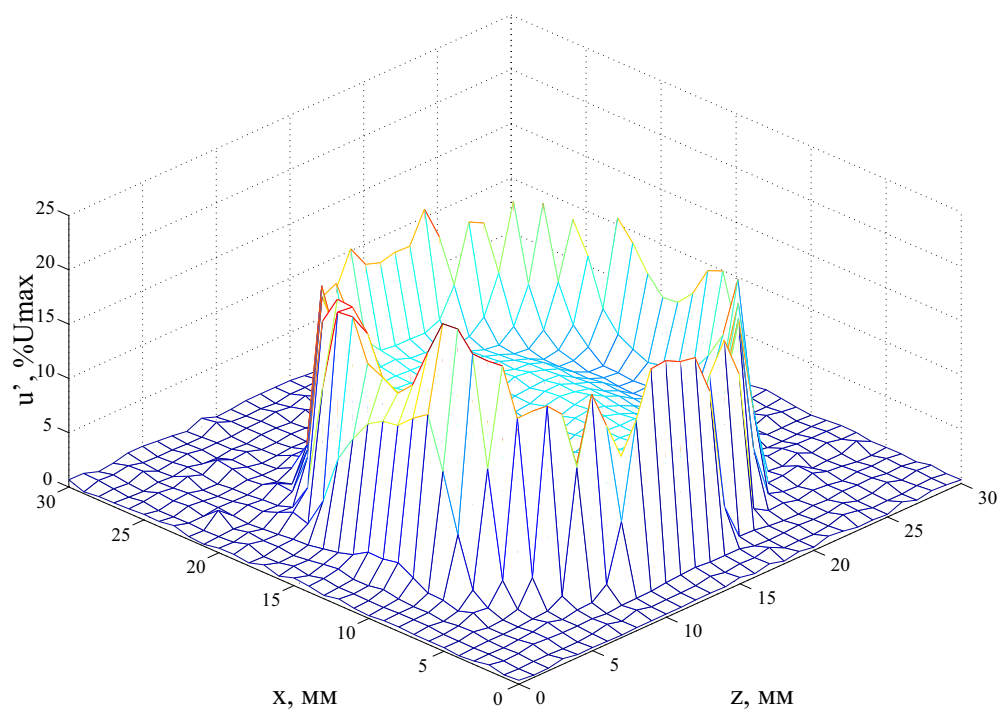


а

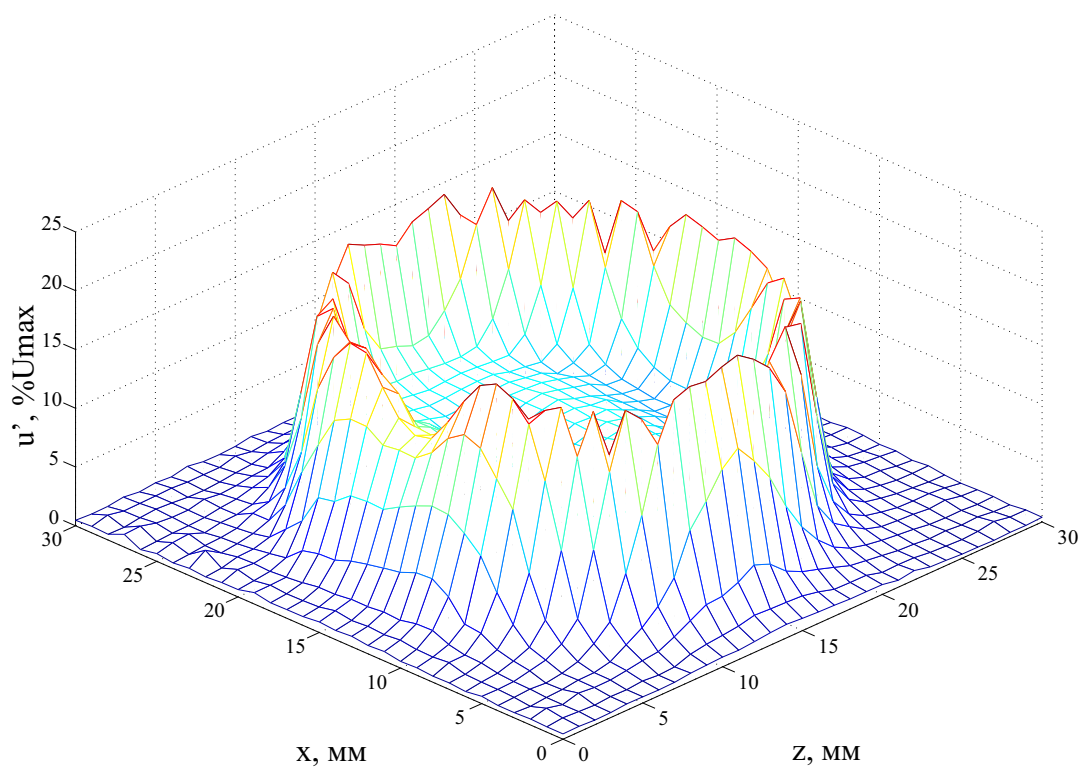


б

Рис. 2. Профили составляющих скорости: а – средняя; б – пульсационная
 $y/d = 0,0575$

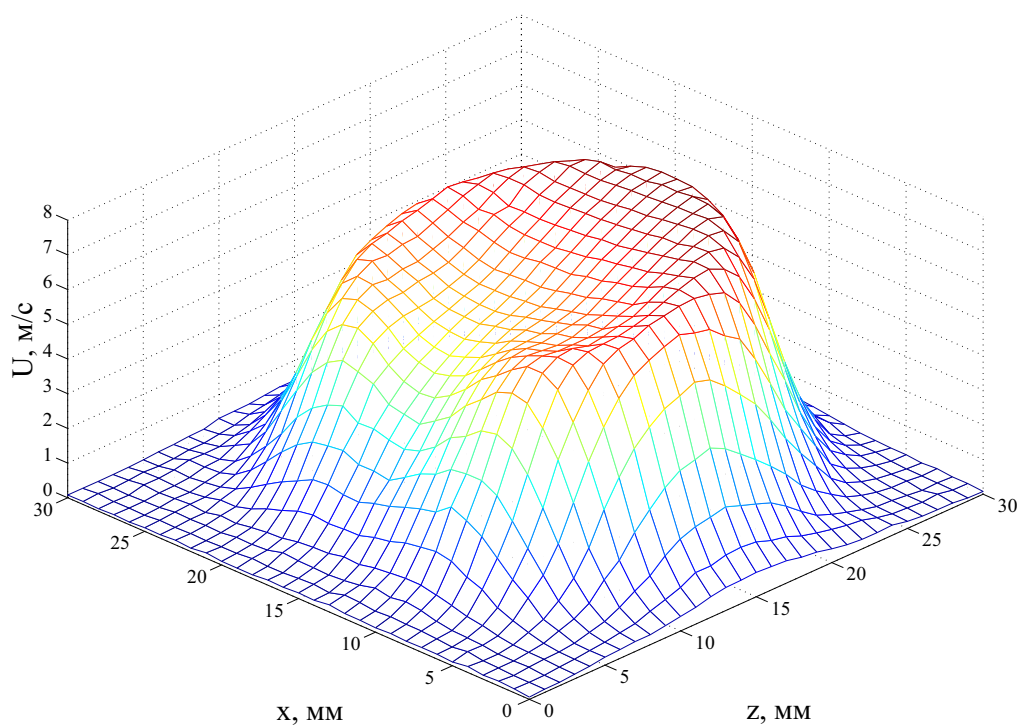


а

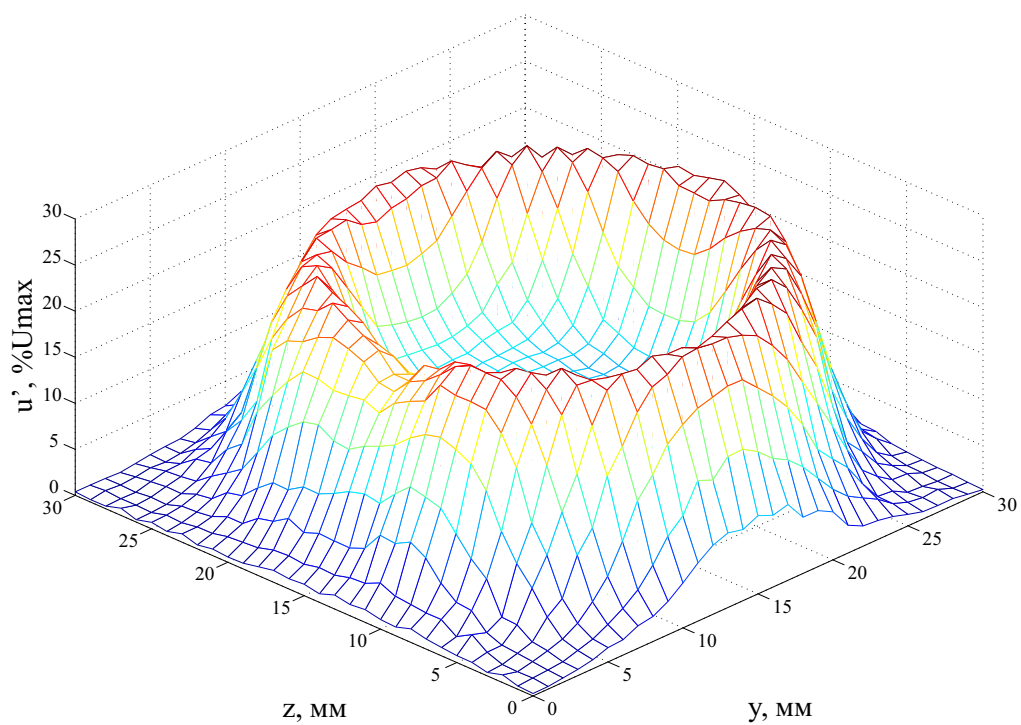


б

Рис 3. Профили составляющих скорости: а – средняя; б – пульсационная
 $y/d = 0,5$

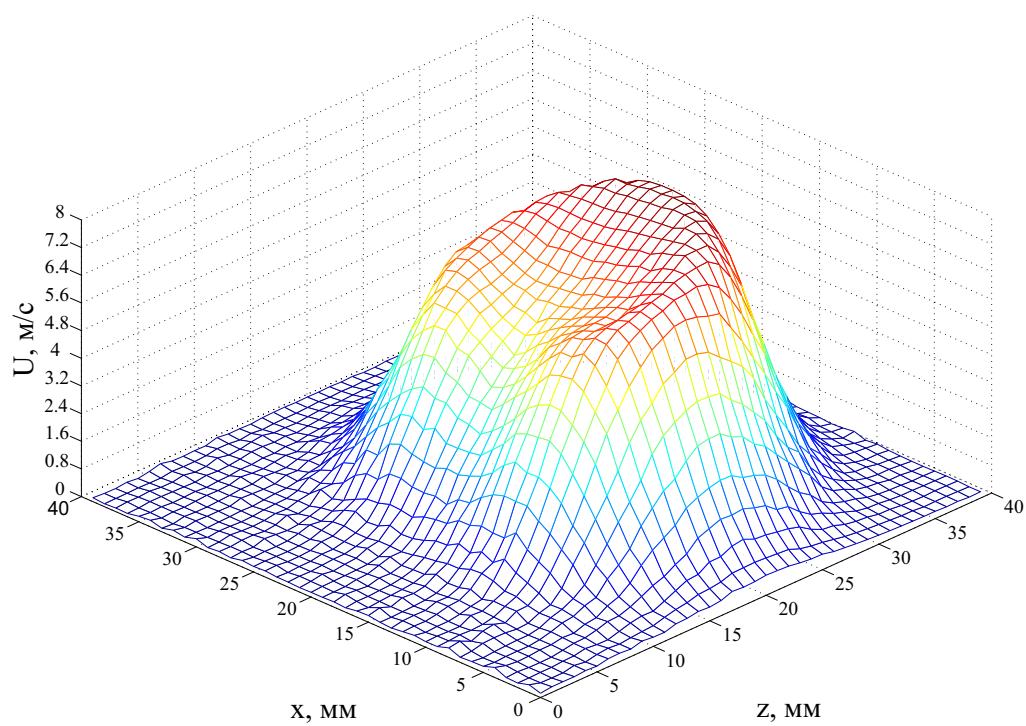


а

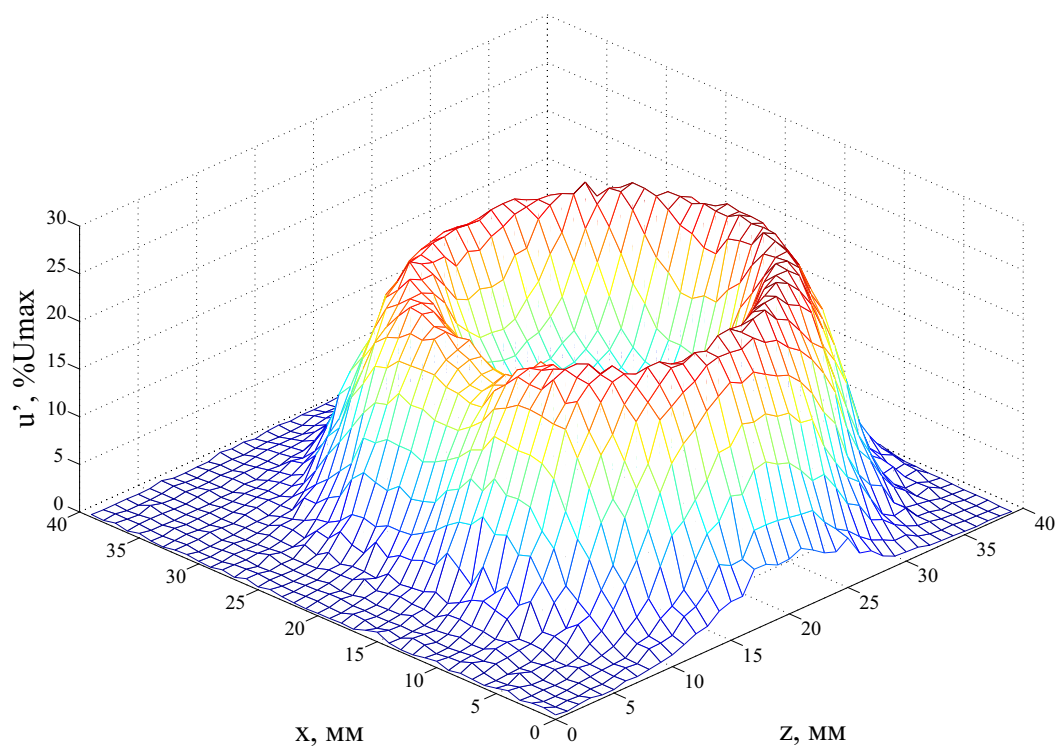


б

Рис 4. Профили составляющих скорости: а – средняя; б – пульсационная $y/d = 1$

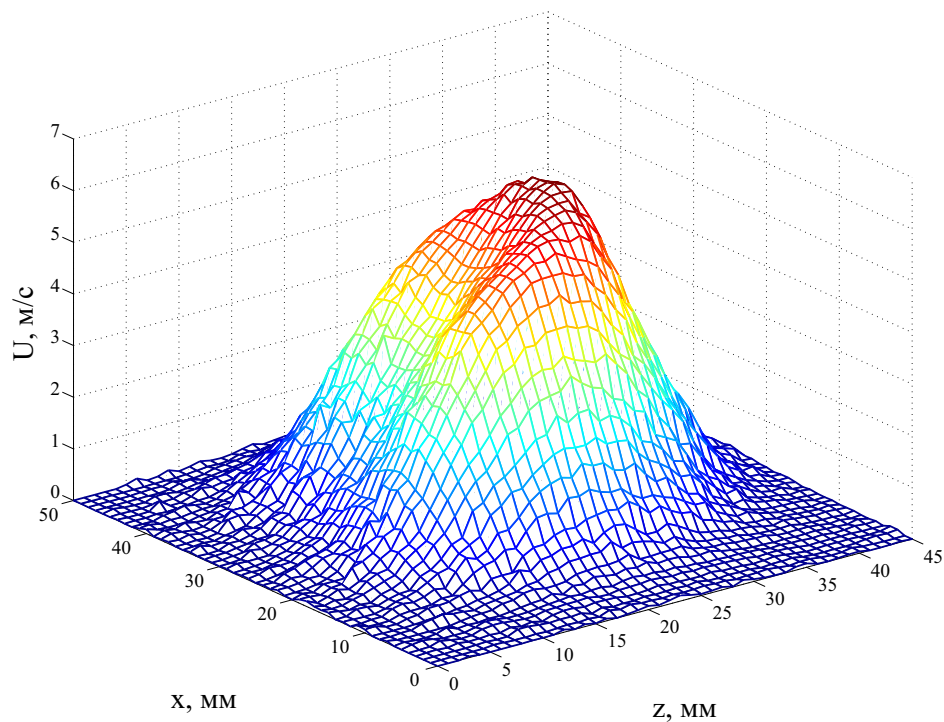


а

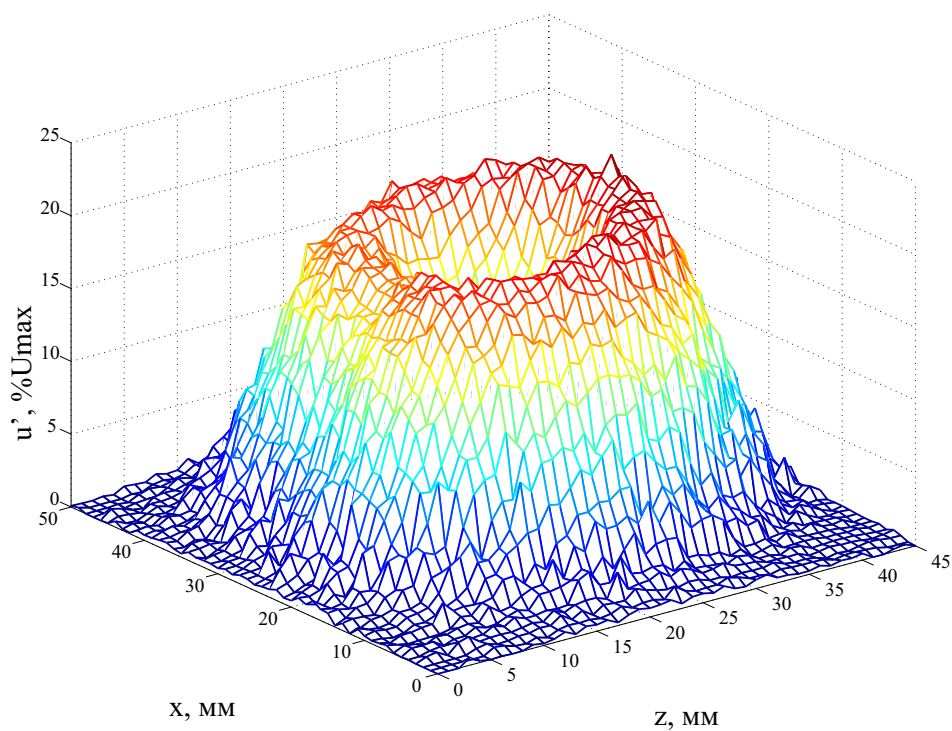


б

Рис 5. Профили составляющих скорости: а – средняя; б – пульсационная $y/d = 2$

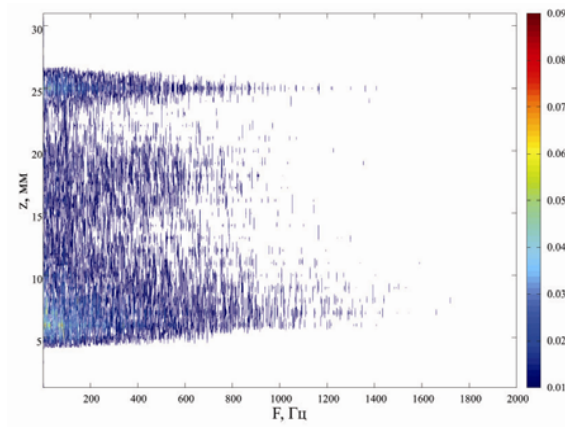


а

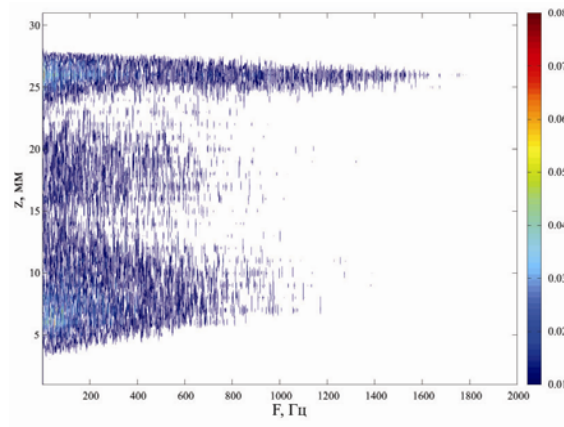


б

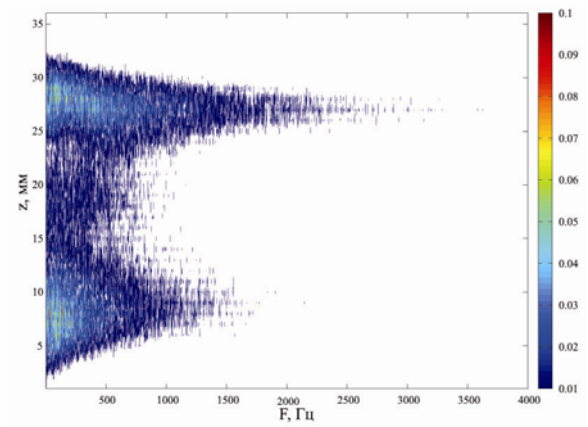
Рис 6. Профили составляющих скорости: а – средняя; б – пульсационная
 $y/d = 3$



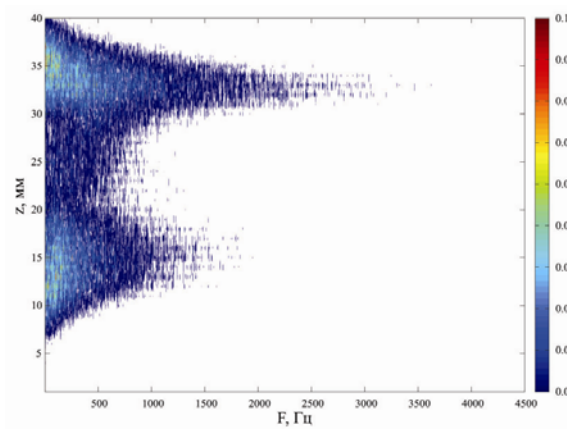
а



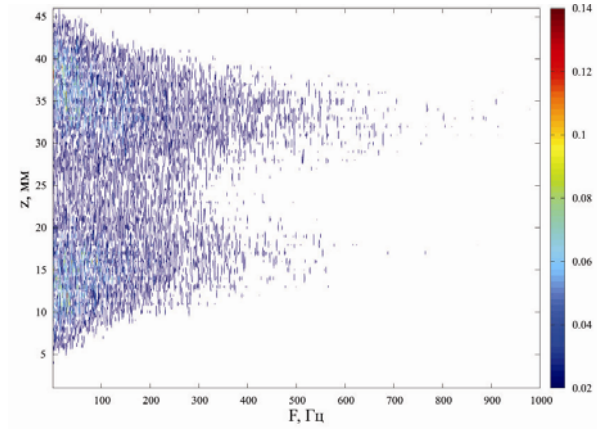
б



в



г



д

Рис 7. Частотный спектр пульсаций: а – $y/d = 0,0575$; б – $y/d = 0,5$; в – $y/d = 1$; г – $y/d = 2$; д – $y/d = 3$

спектра, однако уровень пульсаций растет незначительно и, как и раньше, локализуется в сдвиговых слоях. Несимметрия в частотном спектре определяется разницей сдвиговых напряжений высоко- и низкоскоростной областей, которые наблюдаются на профилях скорости. Со значения $y/d > 2,5$ частотный спектр пульсаций начинает смещаться в область низких частот, что, по-видимому, связано с трансформацией профиля продольной компоненты скорости из сложного трехмерного с мощными градиентами скорости в квазипараболический, что подтверждается профилем скорости, измеренным на расстоянии 3 калибров ниже по течению (см. рис. 6, а).

Выводы

По результатам термоанемометрических измерений в круглой струе, сформированной в криволинейном канале, можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что начиная со среза сопла реализуется сугубо трехмерное течение с наличием компонент завихренности разного знака.

2. В процессе развития струи выделяются высоко- и низкоскоростные области, расположенные со стороны большего и меньшего радиусов скругления канала соответственно.

3. Показано, что в сдвиговом слое, расположенном в высокоскоростной области, наблюдается более высокий уровень пульсаций в сравнении с низкоскоростной областью. Данный факт объясняется наличием градиента скорости и точек перегиба, кото-

рые всегда являются источником роста возмущений.

4. На расстоянии порядка трех калибров происходит значительное утолщение слоя сдвига и параболизация профиля средней скорости.

Список литературы

1. *Dean W. R.* Note on the motion of fluid in a curved pipe // *Phil. Mag.* 1927. Vol. 4. P. 208–223.

2. *Dean W. R.* The stream-line motion of fluid in a curved pipe // *Phil. Mag.* 1928. Vol. 5. P. 671–695.

3. *McConalogue D. J., Srivastava R. S.* Motion of a fluid in a curved tube // *Proc. Roy. Soc.* 1968. Vol. 307. P. 37–53.

4. *Greenspan D.* Secondary flow in a curved tube // *J. Fluid Mech.* 1973. Vol. 57. P. 167–176.

5. *White C. M.* Streamline flow through curved pipes // *Proc. Roy. Soc.* 1929. Vol. 123. P. 645–663.

6. *Eustice J.* Flow of water in curved pipes // *Proc. Roy. Soc.* 1910. Vol. 84. P. 107–118.

7. *Taylor G. I.* The criterion for turbulence in curved pipes. *Proc. Roy. Soc.* 1929. Vol. 124. P. 243–249.

8. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. С. 584–587.

9. *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 22.01.2015

M. V. Litvinenko¹, Yu. A. Litvinenko¹, V. V. Vikhorev²

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

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

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

HOT-WIRE MEASUREMENTS ON THE ROUND JET FORMED BY CURVED PIPE

The results of experimental studies of round jet formed by a curved pipe are presented. The hot-wire measurements of three-dimensional profile of mean and fluctuating streamwise mean velocity components at the nozzle outlet and downstream. The effect of Dean vortices on the jet development are shown. The frequency spectrum for some cross-sections are analyzed. The receptivity of the jet to the low-frequency part of the spectrum are shown.

Keywords: round jet, curved pipe, hot-wire measurements, frequency spectrum.