

УДК 532.526

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

E-mail: litur@itam.nsc.ru

## КРУГЛАЯ СТРУЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СДВИГОВОМ ПОТОКЕ (ОБЗОР)

Представлен обзор результатов экспериментальных и численных исследований по изучению характеристик развития круглой струи с параболическим профилем скорости в поперечном сдвиговом потоке. Показаны принципиальные различия в характеристиках развития круглой струи с ударным и параболическим профилем скорости на срезе сопла. Обнаружено, что неустойчивость круглой струи с параболическим профилем скорости приводит к ее деформации в виде тангенциальных выбросов газа с периферии струи поперечным потоком в окружающее пространство, сворачиванию выбросов в пару противовращающихся вихрей и, вследствие этого, уменьшению размера ядра струи. Показано, что круглая струя с параболическим профилем скорости в поперечном сдвиговом потоке трансформируется, сворачиваясь в два стационарных противовращающихся вихря. Установлено, что наиболее неустойчивые моды с высокими частотами представляют собой волновые пакеты на паре противовращающихся вихрей. Моды на низких частотах развиваются в следе струи ближе к стенке. Обнаружен рост проникновения струи в сдвиговый поперечный поток и подсос жидкости из поперечного потока в ближнем поле струи. Границы раздела струя / поперечный поток могут подвергаться процессу «вытягивания и утоньшения», вызванному поперечным течением.

*Ключевые слова:* круглая струя, сдвиговой поток, визуализация течения, неустойчивость струи, термоанометрия.

### Введение

Характерная конфигурация течения струи в поперечном потоке присуща большинству промышленных приложений – от управления отрывом пограничного слоя до рассеивания загрязнителя из дымовых труб, от пленочного охлаждения лопаток турбин до впрыска топлива в камеры сгорания и топки [1]. Структура течения, свойства смещения и общая динамика струй в поперечном потоке являются предметом многочисленных экспериментальных и численных исследований. Выделяют четыре основные когерентные структуры, характеризующие струю в поперечном потоке: (1) пара противовращающихся вихрей, которые возникают

в ближнем поле струи и, следуя вдоль траектории струи, доминируют в области течения далеко вниз по потоку; (2) вихри слоя сдвига, которые расположены вначале струи и имеют форму кольцеобразных или петлеобразных нитей; (3) подковообразные вихри, формирующиеся в пограничном слое плоской пластины вблизи стенки и распространяющиеся вниз по потоку; (4) «следовые, или вертикальные, вихри», вертикально ориентированные и распространяющиеся в следе струи [2–4]. Точное описание их важных особенностей является предпосылкой для понимания в полной мере динамики возмущенности струй в поперечном потоке и первым шагом в попытке воздействовать на них.

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

Последние достижения в численных методах задействуют анализ глобальной устойчивости течений, дающие возможность полностью оценить двух- и трехмерные течения, – как их устойчивость, так и реакцию поведения к трехмерным возмущениям. А именно использование комбинации новых эффективных методов для численных стационарных решений. Предыдущие исследования устойчивости струи в поперечном потоке [5; 6] основывались на различных невязких течениях, адаптированных на модель вихревой пелены [7]. Авторами [5; 6] было установлено, что коэффициенты нарастания увеличиваются при уменьшении соотношения  $R \equiv V_{\text{струи}} / U_{\infty}$ . Также экспериментально обнаружено [8], что при низкой скорости струи на выходе ( $R < 3,5$ ) внешнее возбуждение имеет малое влияние на структуру течения в отличие от больших величин  $R$ , при которых наблюдается значительный эффект внешнего возбуждения. Это явление указывает на переход от глобально неустойчивого течения, которому присущи самоподдерживающиеся глобальные колебания, к конвективно-неустойчивому течению, которое проявляет себя как усилитель шума [9].

Как отмечено выше, явление струи в поперечном потоке широко исследуется уже много лет [7; 10–20] и особое внимание уделяется развитию структуры крупномасштабного течения, траекториям струи, свойствам смешения и т. п. Интерес к этому явлению вызван, в частности, его разнооб-

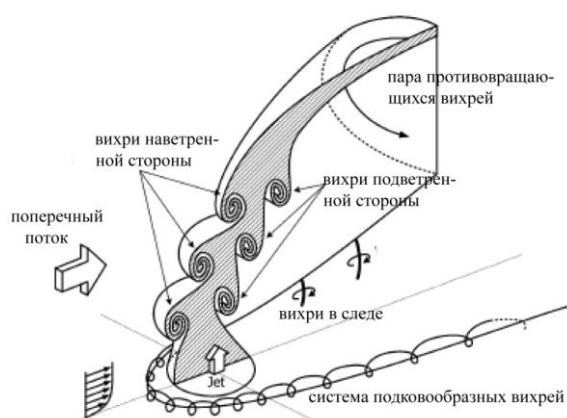


Рис. 1. Схема крупномасштабных вихревых структур, производимых круглой струей, вводимой по нормали к поперечному потоку. Затененная область показывает отклоненное сечение струи вдоль ее оси в направлении поперечного потока (рисунок приводится по: [21])

разной применяемостью в управлении течениями в аэродинамике, оптимизации горения, интенсификации струйного смешения и др. Сложнейшая трехмерная природа течения и вместе с тем недостаточно полное понимание структуры течения вызывают необходимость его дальнейшего изучения. Отклонение струи в поперечном потоке является причиной сильной трансформации как самой струи, так и полей завихренности пограничного слоя поперечного течения, приводящей к формированию нескольких основных вихревых систем, о которых было сказано выше. На рис. 1, представленном в работе [21], показана схема основной вихревой системы. Часть из указанных вихревых структур вовлекает в течение поперечной струи жидкость из внешнего течения.

Например, подсос в ближнем поле в окрестности выхода струи вызван вихрями, формирующимися вдоль поверхностей раздела струя / поперечное течение на наветренной и подветренной сторонах струи [7], в то время как подсос в дальнем поле определяется системой противорвращающихся вихрей далее вниз по потоку [22]. Последними исследованиями [21; 23; 24] обнаружено, что изменения геометрии струи может значительно влиять на получающиеся в результате вихревые структуры, подсос и проникновение струи в поперечный поток. С другой стороны, авторы работ [7; 25] отмечали, что механизм подсоса может затронуть сам процесс проникновения струи в поперечный поток, при более мощном подсосе в ближнем поле может реализовываться большее поперечное отклонение струи и наоборот. Следовательно, какие-либо изменения в генерации вихрей с наветренной и подветренной сторон струи, вероятно, могут иметь заметное влияние на получающееся поле течения. В настоящее время большинство экспериментальных и численных исследований по струям в поперечном потоке ограничено струями с «ударными» профилями скорости на выходе струи. Это в частности связано с тем, что большинство инженерных решений выполнены для высокоскоростных течений, требующих использования коротких входных расстояний для струй. Постановка таких начальных условий может значительно упростить теоретический и расчетный анализ. Авторы исследований [26] обнаружили, что различные профили скорости, а именно «ударный» и

параболический, могут также влиять на развитие структур ближнего поля течения. Расчеты с помощью прямого численного моделирования по влиянию профилей скорости на траектории круглой струи в поперечном потоке [27] показали значительное отклонение между траекториями струи с «ударным» и параболическим профилем. Это натолкнуло авторов на мысль предложить альтернативное масштабирование траекторий струи, учитывающее соотношение инерции струи в поперечном течении. Авторы работ [28; 29] провели исследования по условиям истечения неоднородной струи, однако они не исследовали конкретно «ударную» и параболическую струи в поперечном потоке. Глобальная неустойчивость струи с параболическим профилем скорости в поперечном потоке исследована численно в работе [1], где выделены глобальные неустойчивые моды низких и высоких частот. Качественные и количественные данные по развитию круглой струи как с «ударным», так и с параболическим профилем скорости в поперечном потоке представлены в работе [30]. Контролируемое подавление неустойчивостей, или «реламинаризации», течения при определенных характеристиках развития гидродинамической системы круглой струи в поперечном потоке исследовано в работе [31]. Турбулентная круглая струя в турбулентном пограничном слое изучалась в работе [32]. В целом последние исследования, направленные на установление полного понимания того, как влияет профиль скорости при формировании струи на ее развитие в условиях присутствия поперечного потока, остаются пока не полностью понятными и требующими дальнейшего изучения.

Цель настоящей работы состоит в обобщении результатов последних исследований по развитию круглой дозвуковой струи в поперечном потоке и их сопоставлении с результатами наших исследований. Работа практически продолжает наши недавние исследования, посвященные механизму развития ламинарной и турбулентной круглой струй как с «ударным» (классическим), так и с параболическим профилем скорости [33], а также моделированию неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости к слабому поперечному потоку [34]. Хотелось бы отметить важный нюанс: прежде чем приступить к

изучению механизма развития круглой струи в поперечном потоке, было решено исследовать особенности возникновения и эволюции круглой струи с «ударным» (классическим) и параболическим профилями скорости, сформированными непосредственно на срезе сопла при отсутствии поперечного потока.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Схема и фотография струйной установки, позволяющей изменять начальные условия (распределения средней и пульсационной составляющих скорости) на срезе сопла, показаны на рис. 2. Основой установки является классический короткий сопловой аппарат, выполненный по схеме сопла Витшинского с хонейкомбом и набором детурбулизирующих сеток в форкамере. К выходу классического сопла стыковались трубки различной длины с внутренним диаметром, равным диаметру выходного отверстия классического сопла ( $d = 20$  мм). Данная конфигурация установки позволяла изменять начальные условия струи на срезе сопла, постепенно формируя параболический профиль скорости течения в канале и на выходе из него, пока он не становился полностью профилем скорости, типичным для течения Хагена – Пуазейля для круглой трубы при достаточно большой длине канала. Поток воздуха в канале струйной установки создавался с помощью вентилятора, скорость на выходе из сопла измерялась жидкостным наклонным микроманометром и составляла в данном эксперименте  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d / \nu = 6\,667$ ). Проводилось два вида исследований: дымовая визуализация и термоанемометрические измерения течения в струе. Дымовая визуализация осуществлена с помощью подачи в струйную установку со стороны вентилятора дыма, генерируемого дымогенератором промышленного производства. На выходе из канала струя подсвечивалась лазером и фиксировалась на видеокамеру как в общем виде, так и в продольных и поперечных сечениях. Данная методика детально описана в нашей предыдущей работе [35], где она использована при исследовании процесса развития классической ламинарной струи и механизма ее турбулизации. В упомянутой работе, как и в данной, исследовалось воздействие акустики, генерируемой динами-

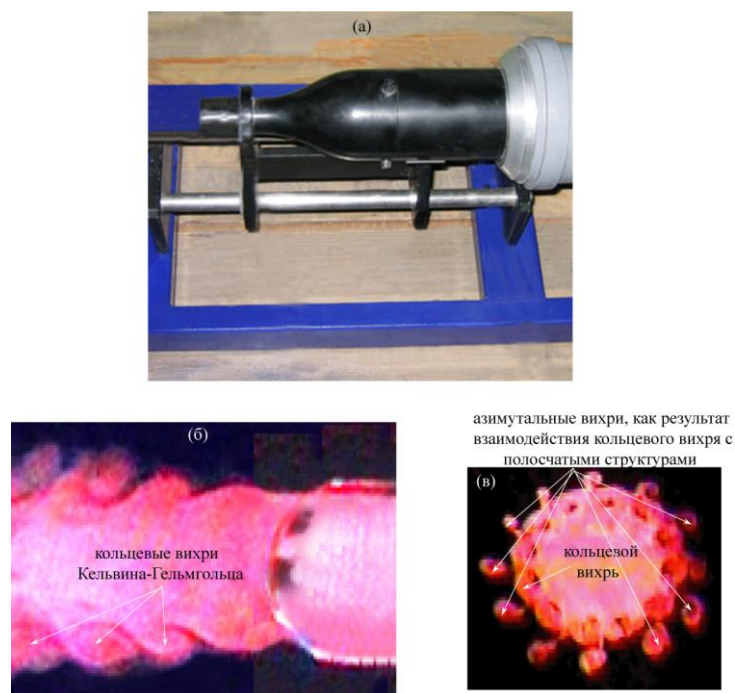


Рис. 2. Струйная установка с коротким классическим соплом для генерации круглой струи (а). Картины визуализации дымом струи в продольном (б) и поперечном (в) сечениях

ческим громкоговорителем, на структуру струи. Следует отметить, что моменты включения лазерной вспышки были синхронизованы с генератором импульсов для громкоговорителя, что позволило визуализировать процесс развития струи в режиме стробоскопирования («остановить картинку»).

Термоанемометрические измерения в струе проведены с помощью термоанемометра постоянного сопротивления фирмы DISA. Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости  $U$  и пульсации скорости  $u'$ . Датчик с нитью из золоченого вольфрама длиной 1 мм и диаметром 5  $\mu\text{м}$  с коэффициентом перегрева 1,8 калибровался в свободном потоке с использованием модифицированного закона Кинга:  $U = k_1(E^2 - E_0^2)^{1/n} + k_2(E - E_0)^{1/2}$ , где  $E$  и  $E_0$  – выходные напряжения термоанемометра при скорости потока и ее отсутствии соответственно;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $n$  – константы. Показатель экспоненты ( $n$ ) обычно близок к 0,5, вторая константа ( $k_2$ ) учитывает свободную конвекцию на стенке при малых скоростях потока. Максимальная ошибка при калибровке датчика не превышала 1 % от  $U_\infty$ . Сигнал с датчика поступал в термоанемо-

метр, затем подавался на аналого-цифровой преобразователь АЦП и далее в компьютер, где данные измерений накапливались в памяти компьютера, затем подвергались программной обработке, и ее результаты представлялись в виде графиков. Перемещение датчика осуществлялось поперек струи с шагом 0,5 мм и вдоль нее в точках с координатами  $x = 2, 10, 20$  мм от среза сопла. Исследовалось развитие как ламинарной, так и турбулентной струи, причем турбулентная струя создавалась с использованием турбулизатора, представляющего собой наждачную бумагу шириной 5 мм (средняя величина зерна шероховатости составляла 300  $\mu\text{м}$ ), наклеенную на внутреннюю поверхность выхода классического сопла. За счет турбулизатора ламинарное и турбулентное течение в струе было реализовано при одной и той же скорости потока.

Графики построены в поперечном сечении струи. Ось абсцисс нормирована на радиус канала, как  $r/R$ , где  $R$  – радиус круглого канала, а  $r$  – текущая координата. Ось ординат нормирована на среднерасходную скорость в струе ( $U_{\text{ср}}$ ). для распределений средней скорости  $U$  поперек струи и на скорость струи на оси канала ( $U_0$ ) для средне-

квадратичных пульсаций скорости ( $u'$ ) в процентах от  $U_0$ . Текущая координата измерений от среза сопла вниз по потоку –  $x$ .

### Результаты измерений и визуализации

Круглая струя с классическим («ударным») профилем скорости на срезе сопла. Результаты экспериментальных исследований механизма развития и турбулизации круглой струи при дозвуковых скоростях с классическим (ударным) профилем скорости представлены в работах [33; 40]. На рис. 2 представлены: фотография струйной установки с коротким классическим соплом для генерации круглой струи (а) и картины визуализации дымом струи в продольном (б) и поперечном (в) сечениях.

На фото можно наблюдать присутствие кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца и результат их взаимодействия с полосчатыми структурами, генерируемыми элементами шероховатостей, наклеенными на внутреннюю поверхность сопла, связанный с появлением азимутальных выбросов в виде  $\Lambda$ - или  $\Omega$ -образных структур. Именно динамика развития этих структур приводит к интенсификации процесса смешения струи с окружающим газом и – в итоге – к турбулизации круглой струи. На рис. 3 представлены распределения средней ( $U$ ) и пульсационной ( $u'$ ) составляющих скорости поперек классической ламинарной круглой струи на различных расстояниях от среза сопла. Из графика видно, что распределение скорости поперек классической струи представляет собой профиль с очень тонким сло-

ем сдвига на периферии струи и обширной областью ядра струи, в котором значительных изменений в распределении скорости практически не наблюдается.

По характеру распределения скорости профиль был условно назван «ударным». По-видимому, такой характер распределения скорости с мощным градиентом в узкой области, окружающей ядро струи, и вызывает непрерывный сход с сопла кольцевых вихрей (вихрей Кельвина – Гельмгольца). При этом максимальный уровень пульсаций скорости наблюдается в области сдвигового слоя струи порядка 1 %  $U_0$  вблизи сопла и растет до 4,5 %  $U_0$  вниз по потоку. В области ядра струи величина пульсаций скорости значительно ниже и изменяется от 0,4 %  $U_0$  вблизи сопла до 1 %  $U_0$  вниз по потоку.

На основании исследований [35] был предложен сценарий механизма образования азимутальных вихревых структур типа  $\Lambda$ - или  $\Omega$ -образных вихрей (см. рис. 2, в) через процесс трехмерного искажения кольцевых вихрей на неоднородностях течения, вызванных наличием полосчатых структур (рис. 4).

В целом, экспериментальные исследования механизма развития классической круглой струи с коротким соплом и «ударным» профилем скорости на срезе сопла показали следующее.

1. Полосчатые структуры могут генерироваться непосредственно на выходе струи из сопла как в естественных условиях, так и в условиях их генерации с помощью элементов шероховатости.

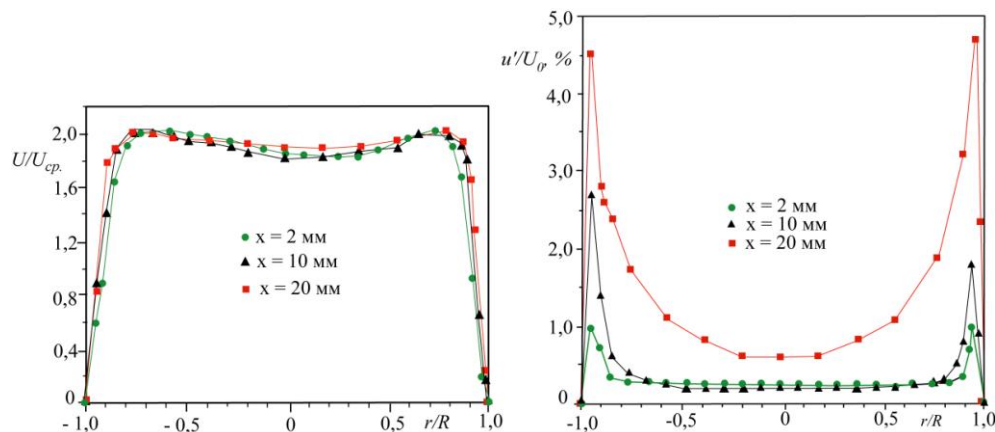


Рис. 3. Профили средней скорости (слева) и пульсаций скорости (справа) в поперечном сечении круглой струи на различных расстояниях от среза сопла, скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d / \nu = 6\ 667$ )

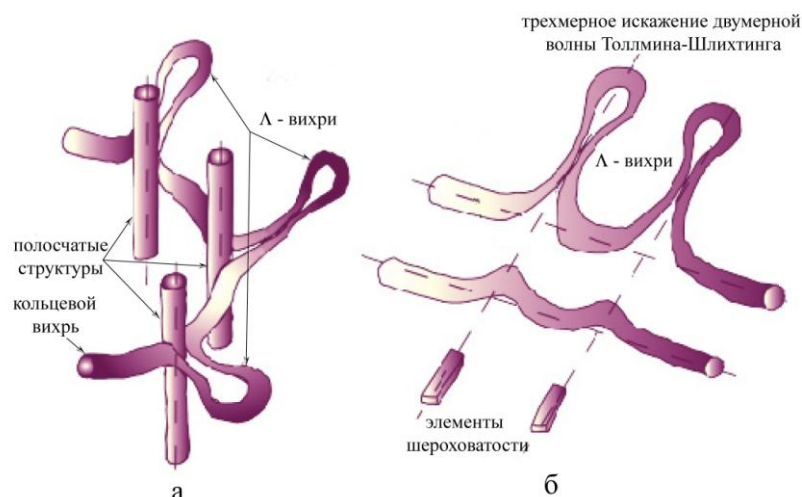


Рис. 4. Схема взаимодействия кольцевого вихря с полосчатыми структурами (а) и трехмерного искажения двумерной волны Толлмина – Шлихтинга (б)

2. Механизм взаимодействия между кольцевыми вихрями и полосчатыми структурами является нелинейным и очень похож на классический сценарий трехмерного искажения двумерной волны на локальных неоднородностях потока.

3. Взаимодействие возмущений приводит к возникновению азимутальных вихревых структур типа  $\Lambda$ - или  $\Omega$ -образных вихрей, эволюция которых вниз по течению приводит к интенсификации смещения струи с окружающим газом, и в итоге струя становится турбулентной.

*Круглая струя с параболическим профилем скорости на срезе сопла.* Результаты экспериментальных исследований механизма развития и турбулизации круглой струи при дозвуковых скоростях с параболическим профилем скорости представлены в работе [33]. На рис. 5 представлены: фотография струйной установки с длиной канала четыре метра для генерации круглой струи с параболическим профилем скорости (I) и картины визуализации струи дымом в продольном направлении (II) и поперечных сечениях (а–з). На картине визуализации струи дымом наблюдается большая протяженность (около 200 мм) чисто ламинарного течения в струе без каких-либо кольцевых вихрей. Далее, вниз по потоку, начинается область перехода струи в турбулентное состояние, где можно четко наблюдать выбросы газа с периферии струи в окружающее ее пространство в виде спиралевидных структур (см. рис. 5 (II), сечения а–з). Данный вид

неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости, связанный с возникновением подобных структур, был исследован в модельном эксперименте, который будет рассмотрен ниже. Другой важной особенностью развития ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости является ее невосприимчивость к акустическому воздействию. Обнаружено, что акустика не оказывает влияния на генерацию каких-либо вихревых структур в области чисто ламинарного течения в струе независимо от частоты и интенсивности акустического воздействия. Напротив, гармоническое акустическое воздействие на круглую струю с ударным профилем скорости с определенной амплитудой и частотой приводит к интенсификации процесса развития полосчатых структур и их взаимодействия с кольцевыми вихрями. Далее, вниз по потоку, процесс турбулизации струи при акустическом воздействии на нее ускорялся по пространству, что указывало на активизацию механизма смещения акустикой. Было установлено, что акустика различной частоты и интенсивности приводит к изменению масштаба кольцевых вихрей и периода их следования [33].

На рис. 6 представлены распределения средней ( $U$ ) и пульсационной ( $u'$ ) составляющих скорости поперек ламинарной круглой струи на различных расстояниях от среза сопла. Видно, что профиль средней скорости в поперечном сечении струи имеет параболическую форму и, в отличие от

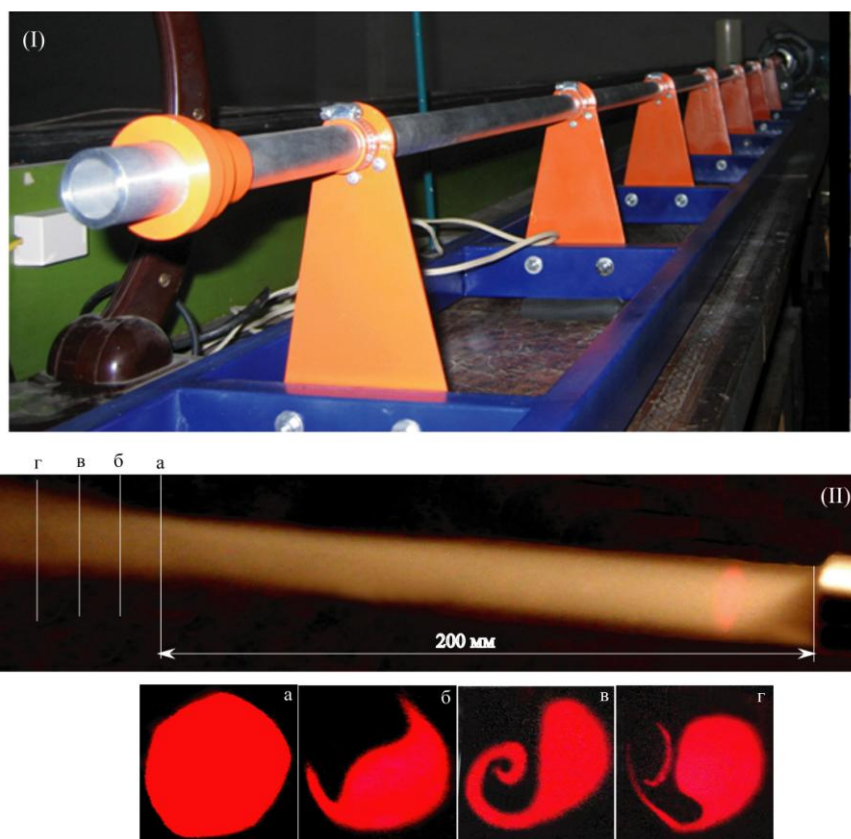


Рис. 5. Канал струйной установки длиной 4 м для генерации струи с параболическим профилем скорости (I) и картины визуализации дымом струи в продольном направлении (II) и поперечных сечениях (а–г)

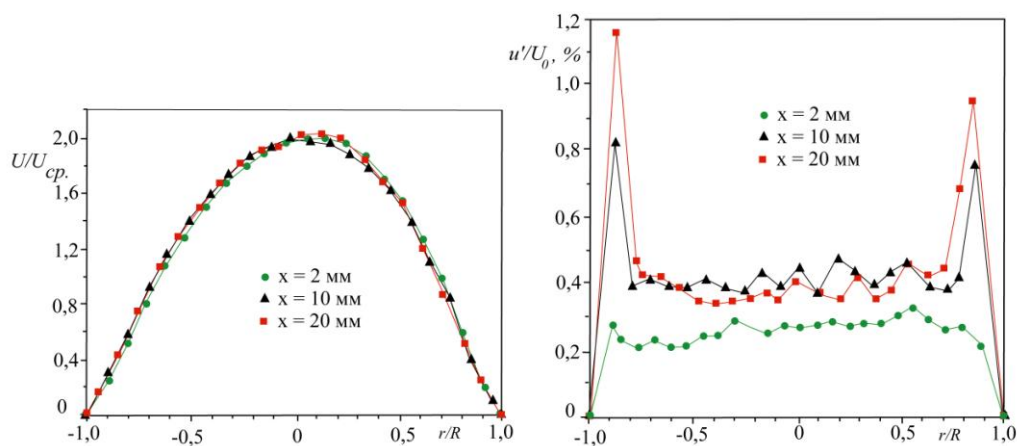


Рис. 6. Распределения скорости (слева) и пульсаций скорости (справа) в поперечном сечении круглой струи, сформированной при истечении из канала длиной 4 000 мм, на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала, скорость потока на оси струи  $U_0 = 5$  м/с ( $Re = U_0 \times d / \nu = 6\ 667$ )

струи с «ударным» профилем скорости, представляет собой сплошной сдвиговый слой.

Максимальный уровень пульсаций скорости 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. В целом, по сравнению с предыдущим случаем, уровень пульсаций скорости заметно снизился в области периферии струи (от 4,5 до 1,2 %  $U_0$  при  $x = 20$  мм), хотя тенденция к его возрастанию вниз по потоку в данной области остается прежней.

Таким образом, принципиальная разница между круглой струей с «ударным» и параболическим профилем скорости на срезе сопла состоит в том, что в последнем случае отсутствует генерация кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца, течение в струе становится чисто ламинарным, протяженностью до десяти калибров. В данной области течения струя не подвержена влиянию акустики, и переход струи в турбулентное состояние связан с появлением неких структур, одна из возможных причин появления которых была исследована в модельном эксперименте.

*Моделирование неустойчивости круглой струи с параболическим профилем скорости к слабому поперечному потоку.* Представленные на рис. 5 картины визуализации

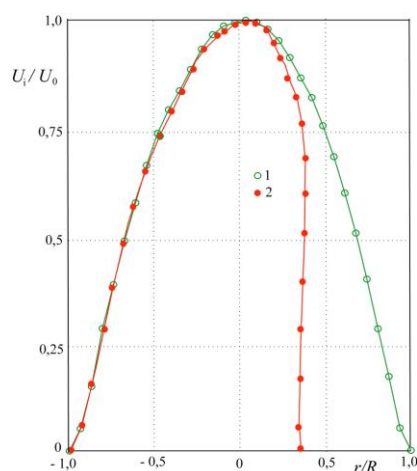


Рис. 7. Распределение средней скорости на выходе круглой струи из сопла без накладки (1) и с накладкой (2), скорость потока на оси струи  $U_0 = 4$  м/с ( $Re = U_0 \times d / \nu = 5\,333$ )

поперечного сечения струи напоминают структуры, которые наблюдали авторы работы [36] для случая круглой струи при наличии внешнего поперечного потока. Как отмечали исследователи, даже при «ударном» профиле скорости на срезе сопла в их эксперименте, искажение кольцевых вихрей под воздействием поперечного течения не имеет отношения к возникновению наблюдаемых ими вихревых структур. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что деформация струи и появление своеобразных крупномасштабных вихревых структур, по-видимому, связано с неустойчивостью струи к поперечному течению, приводящему к искажению параболоида вращения, каковым является эпюра скоростей круглой струи с начальным параболическим профилем скорости.

Для моделирования данного явления был проведен эксперимент [34], где истекающая из сопла круглая струя была искусственно деформирована с одной стороны для воспроизведения структур, возникающих в естественных условиях, с помощью накладки и подвержена слабому поперечному потоку с помощью вентилятора. При этом профиль средней скорости в поперечном сечении струи на срезе сопла (рис. 7, кривая 2) деформировался только в той части, где находилась накладка. Скорость струи на оси  $U_0 = 4$  м/с и  $Re = U_0 \times d / \nu = 5\,333$ . Скорость поперечного струе потока  $U_\infty = 0,5$  м/с. Соотношение скоростей было  $U_0 / U_\infty = 8$ , где  $U_0$  и  $U_\infty$  – скорости струи и поперечного течения соответственно;  $d$  – диаметр сопла;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Типичные картины дымовой визуализации поперечного сечения струи, моделирующей неустойчивость ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости к слабому поперечному потоку представлены на рис. 8.

Видно, что ламинарная струя подвергается деформации в виде «полумесяца» (картина слева) за счет выноса газа с периферии струи в две тангенциальные струи, имеющие тенденцию к сворачиванию в два противовращающихся вихря, как показано на картинах справа. Данные картины качественно похожи на визуализационные картины поперечного сечения круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе



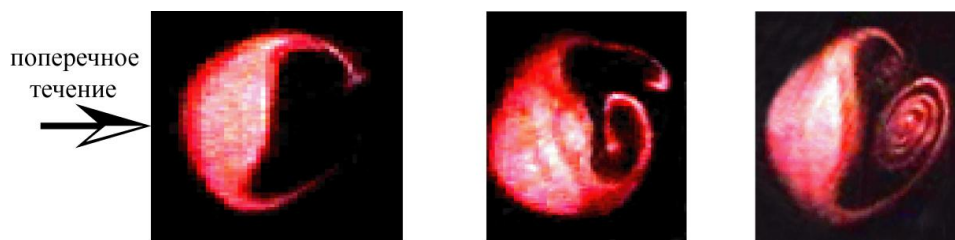


Рис. 8. Картины визуализации дымом поперечного сечения струи (картины слева направо с ростом расстояния от среза сопла  $x/d = 2, 4, 6$ )

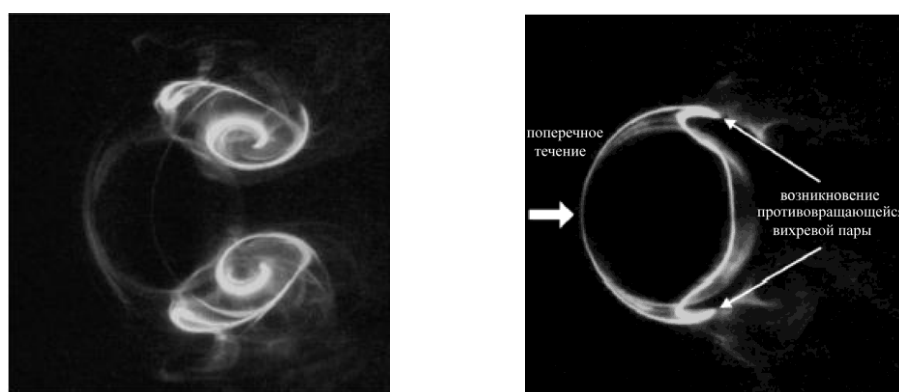


Рис. 9. Картины визуализации процесса деформации круглой струи с характерными тангенциальными выбросами вещества струи на ее периферии (картина слева) и их сворачивания в два противвращающихся вихря (картина справа) под действием внешнего поперечного потока (рисунок приводится по: [36])

сопла, подверженной воздействию поперечного потока с  $U_0 / U_\infty = 4,6$  (рис. 9).

Отчетливо видно, что поперечный к струе поток вызывает тангенциальные выбросы от струи в области ее периферии, причем эти выбросы имеют характерную стреловидную форму, симметричны относительно вектора скорости поперечного потока и имеют тенденцию к сворачиванию в два симметричных противвращающихся вихря.

Авторы [36] отмечают, что данный процесс совершенно не связан с наличием в классической круглой струе вихревых колец Кельвина – Гельмгольца, эволюция которых не связана с наблюдаемым ими процессом, а в механизм подобного искажения и деформации струи под воздействием поперечного потока вовлечена, по-видимому, вся струя как единое целое. Картины на рис. 8 и 9 отражают практически один и тот же процесс, за исключением определенной асим-

метрии в формировании двух противвращающихся вихрей для случая на рис. 8. Это, вероятно, может быть связано с некоторой непараллельностью вектора поперечного потока и осью симметрии струи, искусственно деформированной накладкой.

На рис. 10 представлена схема сворачивания в два противвращающихся вихря круглой струи с ударным профилем скорости на срезе сопла под действием внешнего поперечного потока, как ее представляют авторы работы [36].

Видно, что струя под воздействием поперечного потока при отношении скорости струи к скорости поперечного потока  $U_0 / U_\infty = 4,6$ , криволинейно разворачивается в сторону, противоположную направлению поперечного течения. В нашем случае влияния слабого поперечного потока на изменение направления движения струи практически не обнаружено, вероятно, из-за того, что отношение скорости струи к скорости попе-

речного потока, равное  $U_0 / U_\infty = 8$ , велико. Принципиально же схема ясно отображает процесс воздействия поперечного потока на круглую струю в целом. В сечении А – А можно четко наблюдать появление двух характерных тангенциальных выбросов вещества струи на ее периферии. Вниз по потоку в сечении Б – Б продолжается процесс выноса вещества струи в тангенциальные выбросы, которые сворачиваются в два противорвращающихся вихря, а ядро струи в то же время становится менее наполненным. Все это можно ясно видеть и в нашей ситуации при моделировании аналогичного механизма начала разрушения круглой струи под

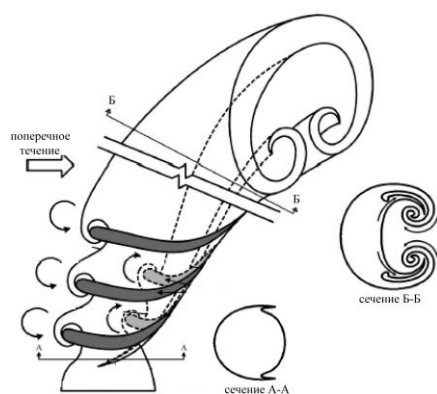


Рис. 10. Схема сворачивания в два противорвращающихся вихря классической круглой струи под действием внешнего поперечного потока (рисунок приводится по: [36])



Рис. 11. Картины дымовой визуализации поперечного сечения струи, подверженной вторичной высокочастотной неустойчивости при акустическом воздействии на нее

воздействием слабого поперечного потока (см. рис. 8).

Под воздействием акустического поля различной частоты и интенсивности можно было наблюдать процесс вторичного высокочастотного разрушения струи в областях тангенциальных выбросов вещества струи с ее периферии как с одной стороны струи (рис. 11, вверху слева), так и с другой (рис. 11, вверху справа). На рис. 11 (внизу) показана картина дымовой визуализации поперечного сечения области тангенциального выброса, подверженного вторичному высокочастотному разрушению, но в более крупном масштабе. Все картины демонстрируют явное наличие высокочастотного возмущения в областях тангенциальных выбросов.

Таким образом, результаты настоящих экспериментальных исследований по моделированию неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости к слабому поперечному потоку показали следующее:

- установлено, что данный вид неустойчивости существует;
- показано, что поперечный поток вызывает деформацию струи в виде тангенциальных выбросов газа с ее периферии в окружающее пространство;
- обнаружено сворачивание выбросов в пару противорвращающихся вихрей и, вследствие этого, наблюдается уменьшение размера ядра струи;
- установлено, что тангенциальные струйные выбросы газа из ядра струи подвержены высокочастотной вторичной неустойчивости.

*Круглая струя в поперечном сдвиговом потоке (в пограничном слое).* Теперь рассмотрим особенности развития круглой дозвуковой струи в поперечном, но уже сдвиговом потоке, а именно в пограничном слое на плоской пластине. Как уже отмечалось, существует большой интерес исследователей к изучению струйных течений с точки зрения их использования в различных технических приложениях. Например, в последнее время пристальное внимание обращено на возможность использования струй как элементов (актюаторов) системы управления течением в пограничном слое. Однако для успешного решения такой проблемы, в частности, необходимо полное понимание процесса взаимодействия струи и попереч-

ного потока сдвигового слоя. Выявление механизмов, которые имеют определяющее значение в развитии струи, дает возможность предложить наиболее эффективные способы воздействия на пристенные сдвиговые течения. В работе [37] показана возможность управления отрывом / присоединением турбулентного пограничного слоя с помощью вихрей, генерируемых актюатором, представляющим собой струю вдуваемую в пограничный слой. В [38] детально исследованы струйные актюаторы для управления течением в сдвиговом потоке в зависимости от частоты, интенсивности вдува, незначительных изменений геометрии и позиций зон оптимального влияния.

В целом, моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости к слабому внешнему поперечному потоку показало, что данный вид неустойчивости имеет особенности, которые невозможно объяснить хорошо известными типами неустойчивостей струйных течений, такими как неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, варикозная и синусоидальная моды неустойчивости и т. д. Как показали численные расчеты [1] (рис. 12), струя при наложении поперечного потока (в данном случае круглая струя в пограничном слое) характеризовалась парой противовращающихся вихрей в дальней области течения, петлеобразными вихрями вдоль сдвигового слоя, подковообразными вихрями, которые формируются в слое сдвига пограничного слоя вблизи выхода струи и вихрями в следе струи. Линейный анализ устойчивости [1] показал, что струя в поперечном течении может характеризоваться самоподдерживающимися глобальными осцилляциями. Полное трехмерное решение задачи устойчивости и глобальные собственные моды рассчитаны прямым численным моделированием, и было показано, что структура течения при исключении затухающей частоты состоит в основном из пары противовращающихся вихрей в дальней области течения и подковообразных вихрей вблизи стенки. Высокочастотные неустойчивые глобальные моды связаны с неустойчивостью пары противовращающихся вихрей, а низкочастотные моды связаны с вихрями, близкими к стенке. В нашем случае, вероятно, можно говорить только о неустойчивости струи к поперечному потоку из-за высокочастотной неустойчивости па-

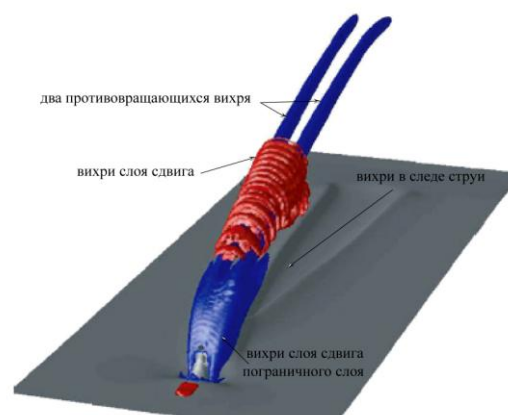


Рис. 12. Результаты прямого численного моделирования возмущений, возникающих при вдуве круглой струи в пограничный слой плоской пластины (рисунок приводится по: [1])

ры противовращающихся вихрей, так как поперечный поток не является сдвиговым в начальном сечении струи, как было в работах [1; 30], где струя вдувалась в пограничный слой. Таким образом, одним из возможных механизмов неустойчивости круглой ламинарной струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла к поперечному потоку, может быть механизм высокочастотной неустойчивости пары противовращающихся вихрей, как показано в работе [1]. Тем более что в исследованиях, представленных выше, выявлена вторичная высокочастотная неустойчивость, по крайней мере, тангенциальных выбросов, из которых и формируется пара противовращающихся вихрей.

Были проведены экспериментальные исследования развития круглой струи с параболическим профилем скорости в сдвиговом поперечном потоке, а именно в пограничном слое плоской пластины. Задачи эксперимента состояли в продолжении изучения особенностей развития струи в поперечном потоке и, в частности, в сдвиговом потоке, а также в сравнении полученных результатов исследования с результатами, опубликованными в работах [1; 30]. Схема эксперимента представлена на рис. 13. В пограничный слой плоской пластины (1) через отверстие (2) диаметром 5 мм, расположенное на расстоянии 250 мм от носика пластины, вводилась круглая струя (3) с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Параболическая форма профиля скорости

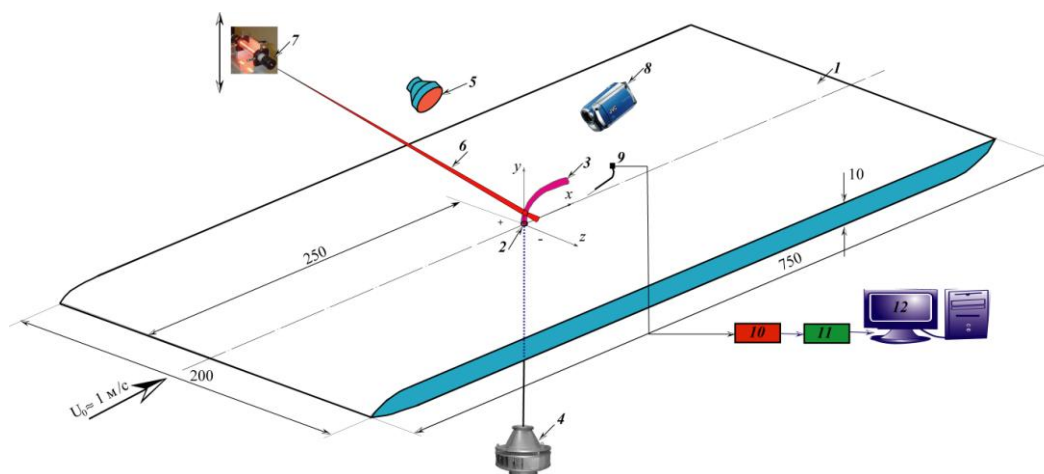


Рис. 13. Схема эксперимента: 1 – плоская пластина; 2 – отверстие диаметром 5 мм для ввода струи в пограничный слой; 3 – круглая струя в пограничном слое; 4 – генератор дыма; 5 – динамический громкоговоритель; 6 – лазерный нож; 7 – рубиновый лазер; 8 – цифровая видеокамера; 9 – датчик термоанемометра; 10 – термоанемометр; 11 – АЦП; 12 – компьютер

на входе струи в пограничный слой достигалась с помощью прохождения воздуха через длинный канал ( $l/d = 200$ , где  $l$  – длина канала;  $d$  – диаметр сопла). Наряду с воздушным потоком, создающим струйное течение, для визуализации струи в него вводился дым с помощью дымового генератора (4). Отношение скорости истечения струи на оси сопла ( $U_{\text{струи}} = 3$  м/с) к скорости набегающего потока ( $U_0 \approx 1$  м/с) на плоскую пластину  $K = U_{\text{струи}} / U_0 \approx 3$ , как и в работах [1; 30]. Струя подвергалась акустическому воздействию с помощью динамического громкоговорителя (5), на который подавался электрический синусоидальный сигнал различной частоты и амплитуды. Визуализированное дымом течение в струе подсвечивалось лазерным ножом (6), моменты включения которого были синхронизованы частотой акустического воздействия на струю. Лазерный нож был получен разверткой луча рубинового лазера линзой в плоский пучок (7). Информация как об общей структуре визуализированной дымом струи, так и об особенностях ее развития в поперечных сечениях записывалась на цифровую видеокамеру (8).

Проведены термоанемометрические измерения распределений продольной компоненты скорости ( $U$ ) и ее пульсаций ( $u'$ ) в пограничном слое и струе в области ее вво-

да в пограничный слой с помощью датчика (9), термоанемометра постоянного сопротивления (10), АЦП (11) и персонального компьютера (12). Обработка экспериментальных данных дымовой визуализации течения и термоанемометрических измерений проводилась с помощью специальных программ на компьютере.

На рис. 14 показан профиль средней  $U_i / U_0 = f(y/\delta)$  составляющей продольной компоненты скорости поперек пограничного слоя, измеренного в точке ввода струи ( $X = 250$  мм). Видно, что профиль  $U_i / U_0 = f(y/\delta)$  соответствует ламинарному течению в пограничном слое и близок к распределению Блазиуса. Уровень интенсивности пульсаций  $u' / U_0$  в свободном потоке составлял 0,17 %  $U_0$ .

На рис. 15 (I) показан профиль скорости  $U / U_{\text{max}} = f(r/R)$  поперек струи, измеренный на срезе выходного сопла. Видно, что профиль имеет параболическую форму распределения, близкую к профилю скорости, формируемую при течении в канале Пуазейля. Здесь же для сравнения показаны профили скорости круглой струи с параболическим профилем (II, III), вводимой в пограничный слой, из работ [1; 30].

Из графиков видно хорошее качественное совпадение профиля скорости на рис. 15 (I) с профилями скорости, измерен-

ными в работе [30] для четырех значений  $K = U_{\text{струи}} / U_0$ , и расхождение с профилем скорости из расчетной работы [1], где, как отмечают сами авторы работы, «профиль струи, повторяющий ламинарный параболический профиль скорости для течения Пуазейля в трубе:

$$v(r) = R(1 - r^2) \exp(-(r/0,7)^4),$$

однако профиль, описанный функцией Гаусса, имеет непрерывное отклонение для всех  $r$  без значительного изменения параболической формы профиля лишь вблизи оси струи».

Теперь сравним картины визуализации круглой струи с параболическим профилем скорости, введенной в пограничный слой плоской пластины, в данном эксперименте и в работе [30].

Видно, что качественно обе картины визуализации течения близки. Однако следует заметить, что чисто технически визуализация из работы [30] более качественная, позволяющая наблюдать структуру течения подробно. Тем не менее основные структурные характеристики развития струи в сдвиговом слое на рис. 16 (слева) можно также отчетливо наблюдать. Начальная область струи представляет собой чисто ламинарное течение без каких-либо вихревых структур, что согласуется с результатами исследований характеристик развития ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости [33]. Основное ядро начальной параболической струи постепенно утоньшается по мере внедрения в поперечный поток, граница раздела струя / поперечный поток остается устойчивой примерно до позиции максимума ее изгиба. Как отмечено в [30], параболическая струя проявляет сильную устойчивость к возбуждению крупномасштабных вихрей на передней кромке и с подветренной стороны вдоль слоев сдвига, в сравнении с аналогичной струей с ударным профилем. Далее, вниз по потоку, можно наблюдать появление крупномасштабных вихревых структур в обоих случаях визуализации течения на рис. 16. Как отмечалось выше, основное ядро начальной параболической струи в поперечном течении постепенно сворачивается в два противоположающихся вихря. Именно на этих стационарных вихрях по причине их неустойчивости и возникают вторичные высокочастотные возмущения, представляющие

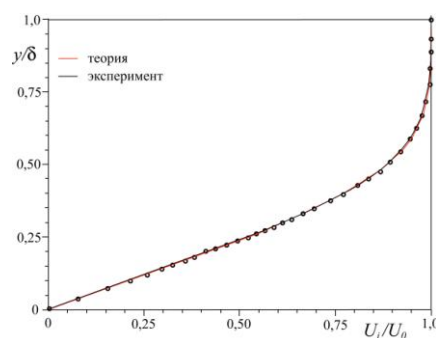


Рис. 14. Распределение средней ( $U_i$ ) составляющей продольной компоненты скорости поперек пограничного слоя в точке ввода струи ( $X = 250$  мм),  $U_0 \approx 1$  м/с,  $Re = U_0 \times X / \nu = 16\ 666$  ( $y$  – текущая координата;  $\delta$  – толщина пограничного слоя)

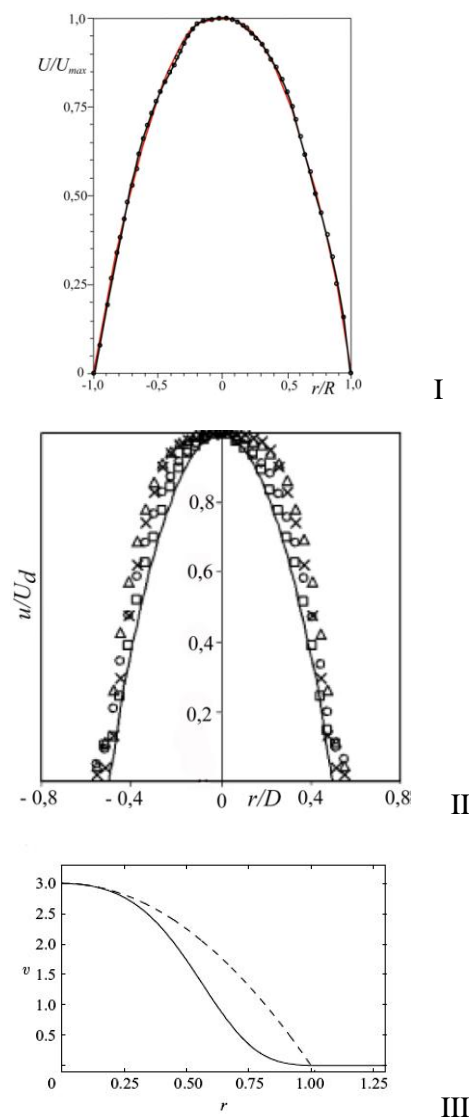


Рис. 15. Профиль скорости, измеренный на срезе выходного сопла: I – настоящий эксперимент; II – график из работы [30]; III – график из работы [1]: нормальная к стенке компонента скорости  $v$  показана сплошной черной линией, а стандартный параболический профиль скорости Пуазейля показан пунктирной линией



Рис. 16. Визуализация дымом струи в пограничном слое при  $K = U_{\text{струи}} / U_{\infty} \approx 3$  в настоящем эксперименте (слева) и визуализация струи в пограничном слое в водяном канале при  $K = U_{\text{струи}} / U_{\infty} \approx 3,5$  из работы [30] (справа)

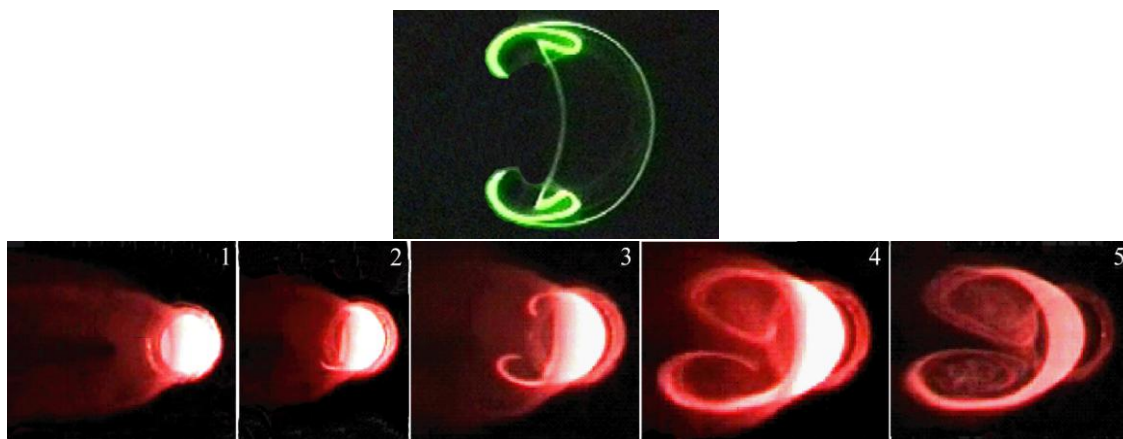


Рис. 17. Картины поперечных сечений, визуализированной дымом струи в пограничном слое: сверху – картина из работы [30]; внизу – картины на различных расстояниях от среза сопла вверх по нормали к поверхности плоской пластины (1–5) в настоящем эксперименте

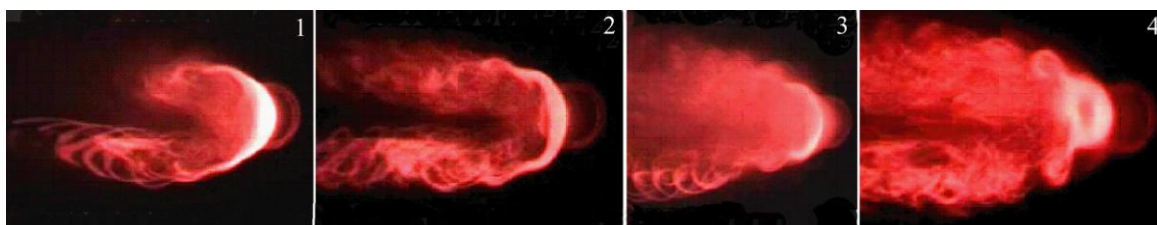


Рис. 18. Картины поперечных сечений, визуализированной дымом струи в пограничном слое на различных расстояниях от среза сопла вверх по нормали к поверхности плоской пластины в области развития высокочастотных вторичных возмущений (1–3) и в области турбулентной струи (4), частота акустического воздействия  $f = 30$  Гц

собой кольцевые или полукольцевые вихри [1].

Рассмотрим картины визуализации струи в ее поперечных сечениях, полученных сканированием лазерным ножом вдоль струи параллельно плоской пластине. На рис. 17 (сверху) для сравнения показана картина визуализации поперечного сечения струи в поперечном потоке из работы [30]. На снимках запечатлен процесс сворачивания струи в два противовращающихся вихря. Аналогичный результат наблюдался и в настоящем эксперименте. На картине визуализации поперечного сечения струи в поперечном потоке вблизи среза сопла (рис. 17, внизу 1) можно наблюдать тело струи и пелену дыма в направлении поперечного потока на стенке, где могут формироваться пристенные вихревые структуры [1]. Далее, вверх по струе, можно видеть постепенное формирование двух противовращающихся вихрей (рис. 17, внизу 2–4) и на картине 5 уже четко видна структура окончательно сформированных двух противовращающихся вихрей.

На рис. 18 представлены картины поперечных сечений визуализированной дымом струи в пограничном слое в области, где четко прослеживается наличие высокочастотных вихревых структур на двух стационарных противовращающихся вихрях. Видна периодичность следования вихрей, задаваемая акустикой с частотой 30 Гц, причем, как видно из картин, можно наблюдать  $\Omega$ -образные вихревые структуры раздельно на каждом из двух стационарных противовращающихся вихрей. Это наблюдение находится в определенном противоречии с результатами численных расчетов [1], где высокочастотные вихревые структуры как бы опоясывают оба стационарных вихря (рис. 19).

Численные расчеты [1], выполненные прямым численным моделированием глобальной неустойчивости струи в поперечном течении при  $K = U_{\text{струи}} / U_0 = 3$  выявили следующие особенности.

1. Наиболее неустойчивые глобальные моды с высокими частотами выделены и представляют собой волновые пакеты на паре противовращающихся вихрей. Эти моды связаны с петлеобразными вихревыми структурами в слое сдвига струи.

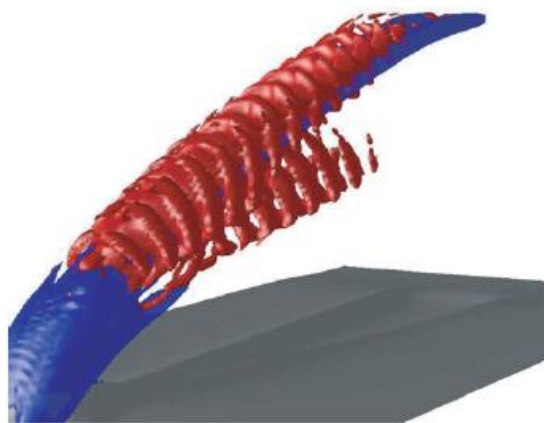


Рис. 19. Наиболее неустойчивая глобальная мода неустойчивости круглой параболической струи в пограничном слое (рисунок приводится по: [1])

2. Глобальные моды на низких частотах, с другой стороны, также имеют значительную амплитуду в следе струи ближе к стенке и могут быть связаны с менее резко выраженными вихревыми структурами, появляющимися вниз по потоку струи в пограничном слое.

В настоящем эксперименте с помощью визуализации течения можно было четко наблюдать формирование двух противовращающихся стационарных вихрей, неустойчивых относительно вторичных высокочастотных возмущений, что приводило к возникновению на них волновых пакетов в форме петлеобразных вихревых структур. Это наблюдение согласуется с первым выводом из работы [1]. Однако нам не удалось наблюдать низкочастотные вихревые структуры в следе струи ближе к стенке, по-видимому, из-за их меньшей выраженности, как отмечено в [1]. Единственное, что можно было наблюдать в настоящих исследованиях, – это вихревую пелену дыма в следе струи в области, близкой к стенке. Возможно, распространение пелены вниз по потоку связано с развитием в этой области течения неких низкочастотных вихревых структур, что требует более детальных исследований.

Измерения мгновенных полей завихренности круглой струи с «ударным» и параболическим профилями скорости на срезе выходного сопла в поперечном потоке проведены в работе [30] и результаты измере-

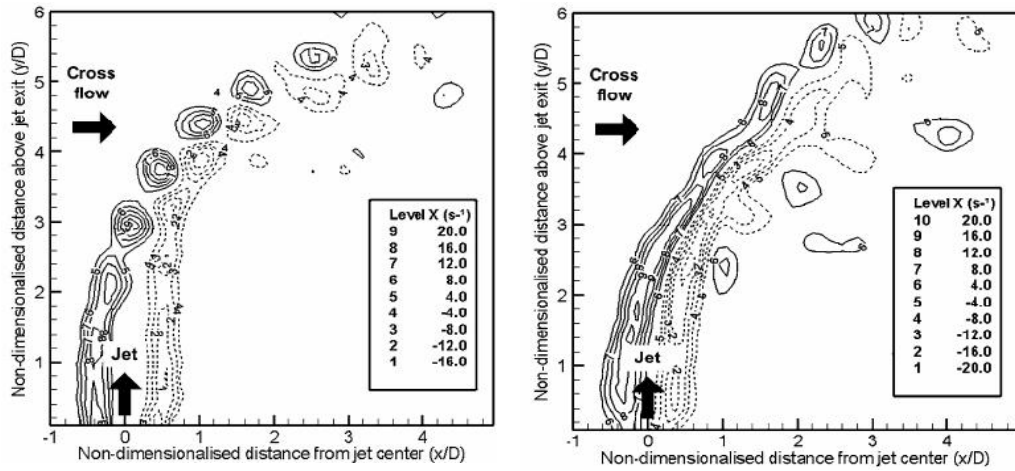


Рис. 20. Мгновенные поля завихренности в плоскости симметрии струи с ударным (слева) и параболическим (справа) профилями скорости при  $K \approx 3,5$  [30]

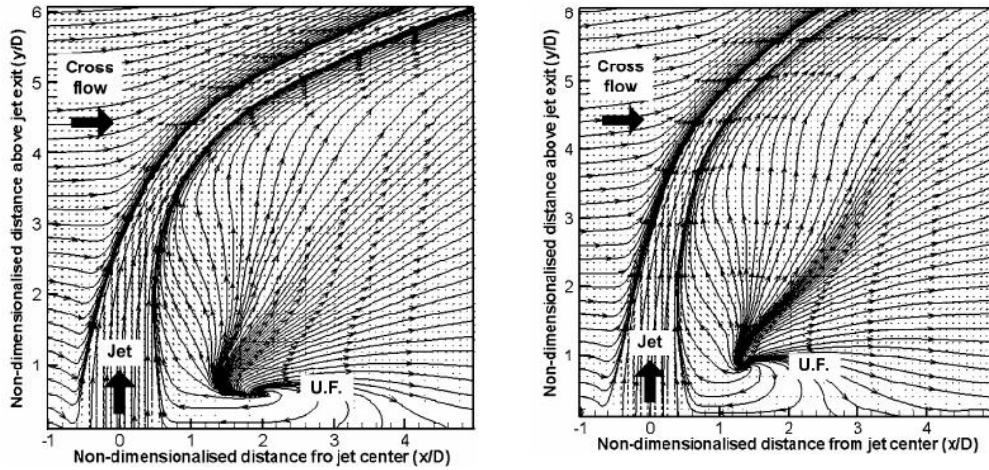


Рис. 21. Осредненные по времени линии тока в плоскости симметрии струи с ударным и параболическим профилями скорости при  $K \approx 3,5$  [30]. Фокус неустойчивости (UF) выделяется на подветренной стороне как ударной (слева), так и параболической (справа) струи

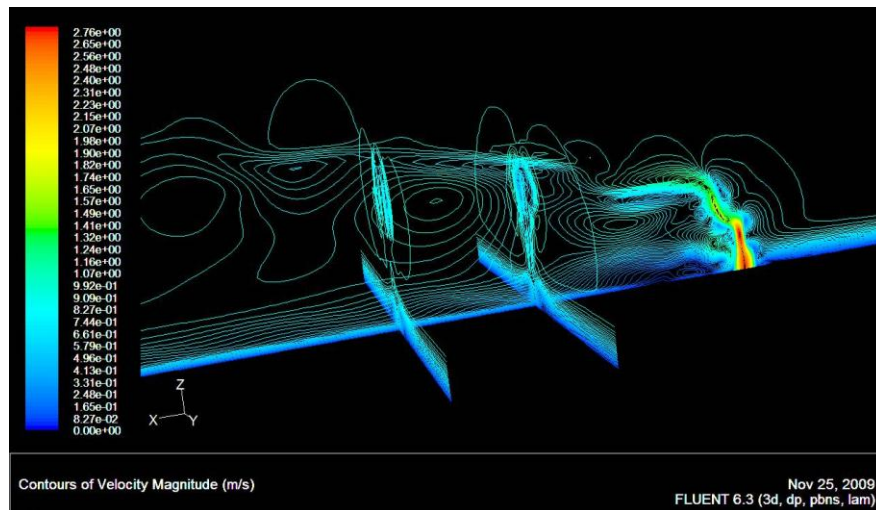


Рис. 22. Изоконтурные скорости круглой струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла взаимодействующей с пограничным слоем плоской пластины, вычисленные с помощью пакета программ Fluent,  $K = U_{\text{струи}} / U_x = 3$



ний при  $K = U_{\text{струи}} / U_{\infty} \approx 3,5$  показаны на рис. 20. Согласно результатам визуализации течения [30], струя с ударным профилем генерирует вихри в окрестности выхода струи вдоль границы раздела струя / поперечный поток (см. рис. 20, слева), в то время как параболическая струя порождает мелкомасштабные вихри только после значительного расстояния вниз по потоку от выхода струи (см. рис. 20, справа). Наличие волнистости в границе раздела струя / поперечный поток для струи с параболическим профилем указывает на неустойчивость слоя сдвига вследствие взаимодействия струи и поперечного течения. Перераспределение завихренности сдвигового слоя является причиной взаимодействия параболического профиля с толстым слоем сдвига, который демпфирует возмущения и неустойчивости, они, в свою очередь, должны приводить к формированию крупномасштабных вихрей вдоль областей границы раздела струя / поперечный поток. Напротив, значительно более тонкие слои сдвига, связанные с «ударным» профилем, представляют наиболее благоприятные условия для формирования крупномасштабных вихрей. Более того, картины завихренности на рис. 20 показывают, что границы раздела струя / поперечный поток в случае струи с параболическим профилем скорости могут подвергаться процессу «вытягивания и утоньшения». Это явление связано с поперечным течением. Такой вывод делается на основе высоких уровней завихренности на границе раздела в сравнении со струей с «ударным» профилем скорости (см. рис. 16).

В случае ударного профиля вытягивание вихревой пелены ограничено ранним формированием вихрей по обе стороны струи (рис. 20, слева). С другой стороны, задержка в формировании вихрей параболической струи гарантирует, что есть достаточно значительная дистанция для процесса ее растяжения. Из результатов измерений завихренности авторы работы [30] делают вывод о том, что в ближнем поле струи с «ударным» профилем имеет место больший подсос, чем в случае струи с параболическим профилем, из-за быстрого формирования вихрей на наветренной и на подветренной сторонах струи. Периодическое формирование данных вихрей создает такую ситуацию, при которой жидкость поперечного потока может практически беспрепятственно прони-

кать в ядро струи с ударным профилем скорости, в отличие от случая с параболическим профилем скорости. Механизм подсоса жидкости из поперечного потока в ядро струи становится более понятен по представленным на рис. 21 осредненным по времени линиям тока для струи с ударным и параболическим профилями скорости.

Несмотря на различия в профилях скорости и развитии крупномасштабных вихревых структур, картины линий тока в обоих случаях отражают схожие топологические структуры с заметными особенностями «фокуса неустойчивости» (UF) в подветренных областях. Что касается «фокуса неустойчивости», он наблюдался ранее в [3; 25] при значительно измененных условиях, которые авторы идентифицировали как «узел неустойчивости», и в [39] для эллиптической струи в слое сдвига. Эти критические точки связаны с поперечным течением, которое разворачивается к подветренной области струи. Как видно из рис. 21, обратное течение наблюдается как в случае ударной, так и в случае параболической струи в поперечном потоке. Появляется небольшое изменение в точке «фокуса неустойчивости» (между  $x/D = 1$  и  $2$ ) при одинаковом  $K$  для любого из двух профилей скорости, хотя они всегда имеют тенденцию формироваться ниже по потоку (примерно  $0,5 D$ ) для ударного профиля скорости струи в поперечном потоке. Это указывает на то, что задержка формирования наветренных и подветренных вихрей в параболической струе может давать возможность поперечному потоку возвращаться раньше или быстрее на подветренную сторону. Наконец, вертикальное расстояние между «фокусом неустойчивости» и дном канала составляет величину, находящуюся в диапазоне  $y/D = 0,4$  и  $1,0$  в обоих случаях. Эти результаты показали, что для данного  $K$  положение «фокуса неустойчивости» не сильно зависит от профиля скорости струи. Однако в целом наблюдались рост проникновения струи и снижение подсоса жидкости из поперечного потока в ближнем поле именно у параболической струи.

Качественные результаты исследований, полученные в нашем эксперименте, не дают пока ответа на вопросы, связанные с процессами, происходящими в ближнем пристенном поле параболической круглой струи, взаимодействующей с пограничным

слоем. Тем не менее важность понимания механизма взаимодействия струи и поперечного сдвигового потока в данной области течения несомненна, как видно из исследований [30], и такие количественные измерения планируется осуществить. Проведены первые предварительные численные расчеты процесса взаимодействия круглой струи с параболическим профилем скорости с поперечным сдвиговым потоком с использованием пакета программ «Fluent». На первом этапе в качестве начальных условий для расчетов были взяты только профили скорости струи и поперечного потока, а также соотношение скоростей  $K = U_{\text{струи}} / U_{\infty} = 3$ . Естественно, этого недостаточно для выявления всех особенностей взаимодействия течений, тем не менее отдельные структурные характеристики течения можно было наблюдать (рис. 22). Расчеты удовлетворительно отражают начальную область струи, где ясно прослеживается утоншающееся вверх ядро ламинарного участка параболической струи и присутствует вихреобразование с подветренной стороны в пристенной области, а также отмечается наличие двух противовращающихся вихрей, наблюдаемых в области поперечных сечений течения в плоскости уз. Однако изолинии, демонстрирующие присутствие крупномасштабных вихрей вниз по потоку, скорее всего следует отнести к ошибкам счета, не учитывающим целый ряд начальных и граничных условий (акустика, характеристики начальной возмущенности течений и т. п.). Тем не менее первый опыт использования пакета программ «Fluent» для расчетов таких течений проведен нами впервые и может быть полезен с точки зрения освоения подобной методики и постепенной ее адаптации к реально наблюдаемым процессам с учетом всех начальных и граничных условий.

В целом, экспериментальные исследования взаимодействия круглой струи с параболическим профилем скорости на ее выходе из сопла с пограничным слоем и их сравнения с известными экспериментальными и численными работами по данной тематике показали, что направление исследований выбрано верно и требуется их продолжение для получения более детальных качественных и количественных данных о протекающих в данной ситуации процессах. Другой важный аспект работы состоит в том, что для понимания сложного механиз-

ма взаимодействия струи с поперечным потоком сначала было необходимо детально разобраться с особенностями развития круглой струи с «ударным» (классическим) и параболическим профилями скорости на срезе сопла. Именно различия в характеристиках, проявляющихся при развитии этих двух видов струй, играют ключевую роль в механизме взаимодействия струи с поперечным потоком. Поэтому в данной работе представлены прежде всего результаты исследований характеристик развития отдельно друг от друга круглой струи с «ударным» и параболическим профилями скорости. Если с механизмом устойчивости и турбулизации круглой струи с «ударным» профилем скорости было все детально исследовано и понятно, то механизм устойчивости и турбулизации круглой струи с параболическим профилем скорости оказался более сложным и непонятным. Было проведено моделирование механизма неустойчивости круглой струи с параболическим профилем скорости, который был обнаружен ранее. Результаты моделирования показали, что вихревые структуры, наблюдаемые на стадии турбулентного разрушения ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости, могут быть обусловлены ее неустойчивостью к слабому поперечному потоку. Именно это приводило к возникновению специфических вихревых структур, связанных с процессом сворачивания струи в два противовращающихся стационарных вихря. При изучении развития струи с параболическим профилем скорости в поперечном сдвиговом потоке наблюдался тот же процесс сворачивания струи в два противовращающихся стационарных вихря.

## Выводы

Обзор работ по результатам исследований развития круглой струи с параболическим профилем скорости в поперечном сдвиговом потоке показал следующее.

1. Выявлены принципиальные различия в характеристиках развития круглой струи с «ударным» и параболическим профилями скорости на срезе сопла.

2. Обнаружено, что неустойчивость круглой струи с параболическим профилем скорости приводит к ее деформации в виде тангенциальных выбросов газа с периферии струи поперечным потоком в окружающее

пространство, сворачиванию выбросов в пару противовращающихся вихрей и, вследствие этого, к уменьшению размера ядра струи.

3. Показано, что круглая струя с параболическим профилем скорости в поперечном сдвиговом потоке подвергается сворачиванию в два стационарных противовращающихся вихря.

4. Установлено, что наиболее неустойчивые глобальные моды с высокими частотами представляют собой волновые пакеты на паре противовращающихся вихрей. Эти моды связаны с  $\Omega$ -образными вихревыми структурами на слое сдвига струи.

5. Показано, что глобальные моды на низких частотах также имеют значительную амплитуду в следе струи ближе к стенке.

6. Обнаружены рост проникновения струи в сдвиговый поперечный поток и подсос жидкости из поперечного потока в ближнем поле для параболической струи.

7. Показано, что границы раздела струя / поперечный поток для параболической струи могут подвергаться процессу «вытягивания и утоньшения», вызванному поперечным течением.

### Список литературы

1. *Bagheri S., Schlatter Ph., Schmid P. J., Henningson D. S.* Global Stability of Jet in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 2009. Vol. 624. P. 33–44.
2. *Fric T. F., Roshko A.* Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet // *J. Fluid Mech.* 1994. Vol. 279. P. 1–47.
3. *Kelso R., Lim T., Perry A.* An Experimental Study of Round Jets in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 1996. Vol. 306. P. 111–144.
4. *Muppidi S., Mahesh K.* Direct Numerical Simulation of Round Turbulent Jets in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 2007. Vol. 574. P. 59–84.
5. *Alves L., Kelly R., Karagozian A.* Local Stability Analysis of an Inviscid Transverse Jet // *J. Fluid Mech.* 2007. Vol. 581. P. 401–418.
6. *Alves L., Kelly R., Karagozian A.* Transverse-Jet Shear-Layer Instabilities. Part 2: Linear Analysis for Large Jet-to-Cross-Flow Velocity Ratio // *J. Fluid Mech.* 2008. Vol. 602. P. 383–401.
7. *Coelho S., Hunt J.* The Dynamics of the Near Field of Strong Jets in Cross-Flows // *J. Fluid Mech.* 1989. Vol. 200. P. 95–120.
8. *Megerian S., Davitian L., Alves L., Karagozian A.* Transverse-Jet Shear-Layer Instabilities. Part 1: Experimental Studies // *J. Fluid Mech.* 2007. Vol. 593. P. 93–129.
9. *Huerre P.* Open Shear Flow Instabilities // *Perspectives in Fluid Dynamics / Eds. G. K. Batchelor, H. K. Moffatt, M. G. Worster.* Cambridge University Press, 2000. P. 159–229.
10. *Keffer J. F., Baines W. D.* The Round Turbulent Jet in a Cross Wind // *J. Fluid Mech.* 1963. Vol. 15. P. 481–496.
11. *Chassing P., George J., Claria A., Sannanes F.* Physical Characteristics of Subsonic Jets in a Cross-Stream // *J. Fluid Mech.* 1974. Vol. 62. P. 41–64.
12. *Andreopoulos J., Rodi W.* Experimental Investigation of Jets in a Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 1984. Vol. 138. P. 93–127
13. *Fric T. F., Roshko A.* Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet // *J. Fluid Mech.* 1994. Vol. 279. P. 1–47.
14. *Kelso R. M., Smits A. J.* Horseshoe Vortex Systems Resulting from the Interaction between a Laminar Boundary-Layer and a Transverse Jet // *Phys. Fluids.* 1995. Vol. 7. P. 153–158.
15. *Eiff O. S., Keffer J. F.* On the Structures in the Near-Wake Region of an Elevated Turbulent Jet in a Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 1997. Vol. 333. P. 161–195.
16. *Blanchard J. N., Brunet Y., Merlen A.* Influence of a Counter Rotating Vortex Pair on the Stability of a Jet in a Cross-Flow: An Experimental Study by Flow Visualizations // *Exp. Fluids.* 1999. Vol. 26. P. 63–74.
17. *Yuan L. L., Street R. L., Ferziger J. H.* Large-Eddy Simulations of a Round Jet in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 1999. Vol. 379. P. 71–104.
18. *Lim T. T., New T. H., Luo S. C.* On the Development of Large-scale Structures of a Jet Normal to a Cross-Flow // *Phys. Fluids.* 2001. Vol. 13. P. 770–775.
19. *Rivero A., Ferre J. A., Giralt F.* Organized Motions in a Jet in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 2001. Vol. 444. P. 117–149.
20. *Su L. K., Mungal M. G.* Simultaneous Measurements of Scalar and Velocity Field Evolution in Turbulent Crossflowing Jets // *J. Fluid Mech.* 2004. Vol. 513. P. 1–45.
21. *New T. H., Lim T. T., Luo S. C.* Elliptic Jets in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 494. P. 119–140.
22. *Smith S. H., Mungal M. G.* Mixing, Structure and Scaling of the Jet in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 1998. Vol. 357. P. 83–122.

23. Haven B. A., Kurosaka M. Kidney and Anti-Kidney Vortices in Cross-Flow Jets // *J. Fluid Mech.* 1997. Vol. 352. P. 27–64.
24. Plesniak M. W., Cusano D. M. Scalar Mixing in a Confined Rectangular Jet in Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 2005. Vol. 524. P. 1–45.
25. Hasselbrink E. F., Mungal M. G. Transverse Jets and Jet Flames. Part 1: Scaling Laws for Strong Transverse Jets // *J. Fluid Mech.* 2001. Vol. 443. P. 1–25.
26. New T. H., Lim T. T., Luo S. C. On the Effects of Velocity Profiles on the Topological Structures of a Jet in Cross-Flow // *Proc. TSFP.* 1999. Vol. 1. P. 647–652.
27. Muppidi S., Mahesh K. Study of Trajectories of Jets in Cross-Flow Using Direct Numerical Simulations // *J. Fluid Mech.* 2005. Vol. 530. P. 81–100.
28. Hale C. A., Plesniak M. W., Ramadhyaani S. Structural Features and Surface Heat Transfer Associated with a Row of Short-Hole Jets in Cross-Flow // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2000. Vol. 21. P. 542–553.
29. Peterson S. D., Plesniak M. W. Evolution of Jets Emanating from Short Holes into Cross-Flow // *J. Fluid Mech.* 2004. Vol. 503. P. 57–91.
30. New T. H., Lim T. T., Luo S. C. Effects of Jet Velocity Profiles on a Round Jet in Cross-Flow // *Experiments of Fluids.* 2006. Vol. 40. No. 3. P. 859–875.
31. Watson G. M. G., Sigurdson L. W. The Controlled Relaminarization of Flow Velocity Ratio Elevated Jet-in-Cross-Flow // *Phys Fluids.* 2008. Vol. 20. P. 094108(1)–094108(15).
32. Gopalan S., Abraham B. M., Katz J. The Structure of a Jet in Cross-Flow at Low Velocity Ratios // *Phys Fluids.* 2004. Vol. 16. No. 6. P. 2067–2087.
33. Козлов Г. В., Грек Г. П., 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.
34. Грек Г. П., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика.* 2009., Т. 4, вып. 1. С. 14–24.
35. Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. П. Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // *ПМТФ.* 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.
36. Lim T. T., New T. H., Luo S. C. On the Development of Large-Scale Structures of a Jet Normal to a Cross-Flow // *Phys. Fluids.* 2001. Vol. 13. No. 3. P. 770–775.
37. Selent B. DNS of Jet in Cross-Flow on a Flat Plate Boundary Layer // *Abstracts of 7<sup>th</sup> ERCOFTAC SIG33 Workshop, 16–18 October 2008. Genova, Italy, 2008.* P. 31.
38. Rist U., Günes H. Qualitative and Quantitative Characterization of a Jet and Vortex Actuator // *Abstracts of 7<sup>th</sup> ERCOFTAC SIG33 Workshop, 16–18 October 2008. Genova, Italy, 2008.* P. 35.
39. New T. H., Lim T. T., Luo S. C. A Flow Field Study of an Elliptic Jet in Cross-Flow Using DPIV Technique // *Exp. Fluids.* 2004. Vol. 36. P. 604–618.
40. Litvinenko M. V. On the Formation and Role of the Longitudinal Structures during the Laminar Breakdown Process in Jets // *Goteborg: Publ. of the Chalmers Univ. of Technol., 2003. Pag. var. p.: Thesis for the Degree of Licentiate in Engineering.*

Материал поступил в редколлегию 18.12.2009

V. V. Kozlov, G. R. Grek, M. V. Litvinenko, Yu. A. Litvinenko, G. V. Kozlov

#### THE ROUND JET IN A CROSS-FLOW (REVIEW)

Results of experimental and numerical studies on characteristics of the developing round jet with parabolic velocity profile in a crossflow are presented. The basic differences of characteristics (parameters, properties) of development of the round jet with parabolic velocity profile and «shock» velocity profile are showed. As it is outlined, the round jet with parabolic velocity profile in a crossflow is transformed to two stationary counter rotating vortices. In the current work it is shown, that the most unsteady high-frequency eigenmodes correspond wave packets onto the couple of counter rotating vortices. Decrease of frequency leads to development of the eigenmodes closer to wall in track of the jet. The growths of penetration of jet into a crossflow and air inflow by near-field of jet from crossflow are observed. In addition, it was shown, that boundary of the jet and crossflow can stretch and become thin under the influence of crossflow.

*Keywords:* round jet, cross-flow, flow visualization, jet instability, hot-wire measurements.