

Г. В. Козлов¹, Ю. А. Литвиненко^{1,2}, Г. Р. Грек^{1,2}, А. М. Сорокин^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: litvienko@ngs.ru

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ЛАМИНАРНОЙ И ТУРБУЛЕНТНОЙ КРУГЛЫХ СТРУЯХ *

В работе представлены результаты экспериментальных исследований механизма возникновения и развития ламинарной и турбулентной круглых струй. Показаны особенности развития ламинарной и турбулентной круглых струй, реализованных при одном и том же числе Рейнольдса. Обсуждаются картины дымовой визуализации ламинарной и турбулентной струй и результаты термоанемометрических измерений (распределений средней и пульсационной составляющих скорости) в поперечных сечениях ламинарной и турбулентной струй на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла. Проведен анализ результатов визуализации и термоанемометрических измерений обоих типов течений. На основании полученной информации делается вывод об общих чертах механизма возникновения и развития когерентных структур в ламинарной и турбулентной струях. Установлено, что характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струй к акустическим возмущениям близки.

Ключевые слова: круглая струя, когерентные структуры, восприимчивость, дымовая визуализация, термоанемометрия.

Введение

Исследованию струйных и свободных сдвиговых течений посвящено большое количество как теоретических [1–4], так и экспериментальных работ [5–9].

Важность таких исследований очевидна как с точки зрения понимания физической природы развития струй, так и их практического использования в различных технических приложениях. Например, струи создают реактивную тягу ракет и самолетов и управляют полетом этих аппаратов, используются для работы турбин, применяются для смешения газов и жидкостей в химической и медицинской промышленности, микроструи используются в струйных принтерах и т. д.

Для организации струйного течения служит так называемый сопловой аппарат, представляющий собой, в случае реактивного со-

пла, специально спрофилированный насадок, устанавливаемый для преобразования потенциальной энергии протекающего рабочего тела (жидкость, пар или газ) в кинетическую энергию. После прохождения реактивного сопла повышается скорость движения рабочего тела. Впервые такое сопло было применено К. Г. П. Лавалем в 1889 г. для повышения скорости истечения пара перед рабочим колесом паровой турбины. Теория реактивного сопла разработана С. А. Чаплыгиным в 1902 г. Струя по характеру истечения может быть ламинарной и турбулентной, дозвуковой и сверхзвуковой. Суживающиеся реактивное сопло используют для создания дозвуковых скоростей истечения, а сопла с расширяющейся выходной частью (сопло Лавала) – для получения сверхзвуковых скоростей. Если скорость истечения не превосходит скорости, с которой в вытекающих газах

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-01-00034), Министерства образования и науки РФ (проект РНП. 2.1.2.3370) и гранта Президента РФ (проект МК – 420.2008.1).

распространяются звуковые волны, то сопло представляет собой простой цилиндрический или суживающийся отрезок трубы.

В настоящее время для формирования, например, круглой дозвуковой струи часто используют осесимметричное сопло Витшинского² [10]. Для разбиения крупных вихревых структур, поступающих с лопаток вентилятора, на более мелкие и выравнивание потока перед входом непосредственно в сопловой аппарат в форкамере струйной установки устанавливают хонейкомб и набор детурбулизирующих сеток. При этом на срезе сопла формируется струя с ламинарным характером течения в определенном диапазоне чисел Рейнольдса. Неустойчивость такой круглой струи обычно связывают с возникновением вихревых колец – так называемых вихрей Кельвина – Гельмгольца. Начальные условия на срезе сопла, т. е. распределение средней и пульсационной составляющих скорости потока, создают условия формирования структуры струи, ее неустойчивости и дальнейшей турбулизации вниз по потоку. Первичная неустойчивость ламинарной круглой струи, связанная с возникновением двумерных кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца, изучалась многими исследователями. Среди последних работ следует отметить обзор [11], в котором анализируются результаты изучения собственных колебаний вихревого кольца, возникновения в нем турбулентности и генерации звука в идеальной несжимаемой жидкости.

В работе [4] впервые показано, что сдвиговый слой осесимметричной струи содержит упорядоченные вихревые структуры. Измерения, выполненные в [12], показали, что вихревые структуры взаимодействуют и объединяются. Позднее была предложена модель «вихревой дорожки», описывающая эволюцию азимутальных вихревых колец [13]. При измерении в круглой струе вблизи сопла авторы работы [7] показали, что вначале возникает первичная неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, ведущая к последовательному сворачиванию слоев сдвига в вихревые структуры, представляющие собой череду вихревых колец. Вторичные неустойчивости формируют продольные вихревые структуры, взаимодействующие с первичными вихревыми кольцами. Продольные структуры формируются в областях между со-

седними вихревыми кольцами и оказывают существенное влияние на процессы смешения и динамику течения. В работах [14; 15] показано, что продольные структуры играют важную роль в механизме турбулизации струй через процесс их взаимодействия с кольцевыми вихрями, приводя к трехмерному искажению последних и появлению азимутальных выбросов в виде Λ или Ω – образных вихрей, вторичное разрушение которых приводит к турбулизации струи. В работе [15] представлен сценарий механизма турбулизации ламинарной круглой струи через процесс трехмерного искажения двумерных кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца на локальных неоднородностях потока (полосчатых структурах). Данный процесс приводит к возникновению азимутальных выбросов, инициирующих и интенсифицирующих процесс смешения струи с окружающим газом.

Исследования турбулентных струй [16] показали существование когерентных структур на начальном участке. В [16] выполнены детальные измерения когерентных колец и выявлен механизм азимутального вихревого взаимодействия. Экспериментальные и численные исследования [17] показали, что между вихревыми кольцами присутствуют продольные структуры, которые при этом играют важную роль в переходе к турбулентности. В работе [18] показано, что наиболее важным процессом в развитии когерентных структур в турбулентной струе является вулканоподобный «взрыв», обусловленный прохождением азимутальной когерентной структуры или кольца вблизи потенциального ядра струи. Кольцевые вихри инжектируют высокоскоростную жидкость. Внедрение этой жидкости между соседними кольцами создает высокие напряжения сдвига, играющие важную роль в эволюции продольных вихревых пар, вращающихся в противоположных направлениях.

Возникает вопрос, сохраняются ли особенности возникновения и развития вихревых структур в ламинарной струе, упомянутой выше, в процессе развития турбулентной струи, или в механизме поддержания турбулентного течения существуют и работают иные механизмы? Ответить на данный вопрос мы попытались экспериментальными исследованиями, результаты которых представлены ниже.

Таким образом, цель данной работы состояла в экспериментальных исследованиях механизма возникновения и развития когерентных структур в ламинарной и турбулентной круглых струях, генерированных при одной и той же скорости истечения, с помощью дымовой визуализации течения и термоанемометрических измерений начальных условий формирования струй на срезе сопла.

Экспериментальная установка и методика измерений

Схема и фотография струйной установки показаны на рис. 1, 2. Основой установки является классический сопловой аппарат, выполненный по схеме сопла Витошинского (1) с хонейкомбом (2) и набором детурбулизирующих сеток (3) в форкамере (4) (см. рис. 1). К выходу классического сопла (1) стыковалась удлинительная трубка (5) длиной 150 мм с внутренним диаметром, равным диаметру выходного отверстия «классического» сопла ($d = 20$ мм). Данная конфигурация установки позволила реализовать как ламинарную, так и турбулентную струю. Причем турбулентное течение в струе создавалось с помощью турбулизатора (6) (см. рис. 1), представляющего собой наждачную бумагу шириной 5 мм (средняя величина зерна шероховатости составляла 300 мкм), наклеенную на внутреннюю поверхность выхода классического сопла. Удлинительная трубка (5) создавала условия нарастания толщины турбулентного пограничного слоя в канале, чтобы получить

распределение скорости на срезе сопла, приближенное к турбулентному распределению, но еще остающееся «ударным». Иначе, при полностью турбулентном профиле скорости, очень сложно выделить когерентные структуры из турбулентного шума. Ламинарное и турбулентное течения в струе были реализованы при одной и той же скорости потока.

Поток воздуха в канале струйной установки создавался с помощью вентилятора (6), скорость на выходе из сопла (1) измерялась жидкостным наклонным микроманометром (7) и составляла в данном эксперименте $U_0 \approx 4$ м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 5333$). Проводилось два вида исследований: дымовая визуализация и термоанемометрические измерения течения в струе. Дымовая визуализация осуществлялась с помощью подачи в струйную установку со стороны вентилятора дыма, генерируемого дымогенератором (8) промышленного производства (см. рис. 1). Развитие визуализированной дымом струи и ее структура снимались на видеокамеру (9) как в общем виде, так и в ее продольном и поперечном сечениях с помощью подсветки сечений узким лазерным ножом в различных координатах вдоль и поперек струи (см. рис. 1). Данная методика детально описана в нашей предыдущей работе [15], где она использовалась при исследовании процесса развития классической ламинарной круглой струи и механизма ее турбулизации. В той же работе, как и в данной, исследовалось воздей-

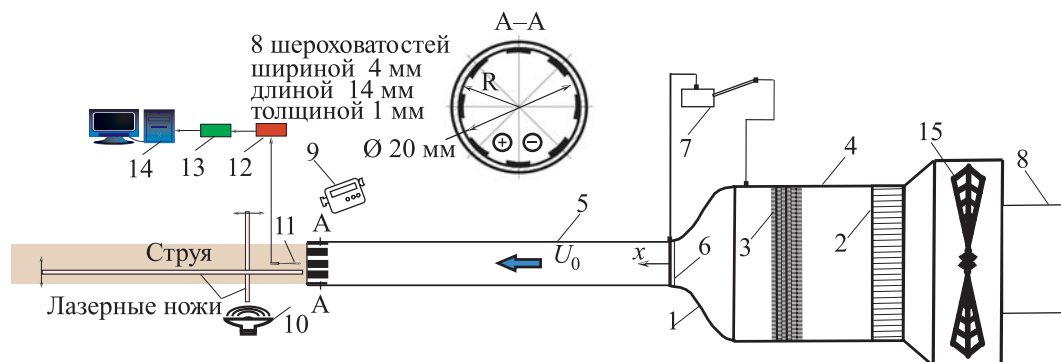


Рис. 1. Схема струйной установки: 1 – сопло Витошинского; 2 – хонейкомб; 3 – набор детурбулизирующих сеток; 4 – форкамера; 5 – удлинительная трубка 150 мм; 6 – турбулизатор; 7 – жидкостный наклонный микроманометр; 8 – генератор дыма; 9 – видеокамера; 10 – динамический громкоговоритель; 11 – датчик термоанемометра; 12 – термоанемометр; 13 – АЦП; 14 – компьютер; 15 – вентилятор

ствие акустики, генерируемой динамическим громкоговорителем (10), на структуру струи. С ее помощью также синхронизовался сход вихрей Кельвина – Гельмгольца с моментами включения инфракрасного лазера на короткий промежуток времени для стробоскопирования динамики взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами и возможности записать этот процесс на видеокамеру.

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 (11) с проволочкой из золоченого вольфрама длиной 1 мм и диаметром 5 мм с коэффициентом перегрева 1,8 калибровался в свободном потоке с использованием модифицированного закона Кинга: $U = k_1(E_2 - E_{02})^{1/n} + k_2(E - E_0)^{1/2}$, 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_0 . Сигнал с датчика (11) поступал в термоанемометр (12), затем подавался на аналого-цифровой преобразователь АЦП (13), и далее в компьютер (14), 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 $x = 1; 2; 5; 20$ мм. Исследовалось развитие как ламинарной, так и турбулентной струи.

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 максимальную скорость на оси струи (U_0) для распределений средней скорости U_i поперек струи и для среднеквадратичных пульсаций скорости (u') в процентах от (U_0).

Текущая координата измерений от среза сопла вниз по потоку – x .

Результаты визуализации течения и термоанемометрических измерений

Ламинарная и турбулентная струя при одной скорости потока. На рис. 3, 4 показаны установки для реализации ламинарной и турбулентной круглых струй соответственно. Видно, что отличие состоит лишь в наличии турбулизатора на выходе для классического сопла в случае реализации турбулентной струи. Картины визуализации течения ламинарной струи представлены на рис. 5. На рис. 5, а можно наблюдать процесс перехода (наличие кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца) и турбулизацию течения далее вниз по потоку. На рис. 5, б (продольное сечение струи в области ее периферии) показаны полосчатые структуры, генерируемые элементами шероховатостей, расположенными на выходе соплового аппарата. Именно взаимодействие полосчатых структур с кольцевыми вихрями приводит к турбулизации ламинарной круглой струи [15]. На рис. 5, в показаны картины визуализации течения ламинарной струи в поперечных сечениях на различных расстояниях от среза сопла. Ясно видны кольцевые вихри и следы полосчатых структур на периферии круглой струи (см. рис. 5, в при $x = 15$ и 22 мм). Далее вниз по потоку можно наблюдать процесс взаимодействия этих возмущений, сопровождаемый образованием азимутальных выбросов (см. рис. 5, в при $x = 30$ мм), динамика развития которых приводит к интенсификации механизма смешения струи с окружающим газом и быстрой ее турбулизации (см. рис. 5, в при $x = 45$ мм),

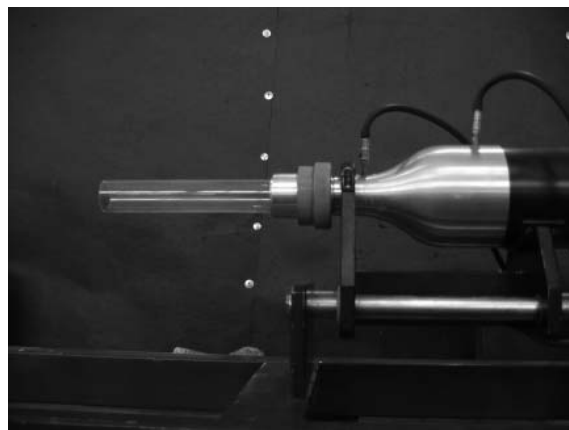


Рис. 2. Общий вид струйной установки с каналом длиной 150 мм

что отмечалось и в наших предыдущих исследованиях [14; 15].

Картины визуализации течения турбулентной струи представлены на рис. 6. Общий вид струи показан на рис. 6, а. Видно, что турбулентное состояние течения реализуется практически со среза сопла и угол, под которым турбулентная струя распространяется вниз по потоку, составляет примерно 15° , что совпадает с результатами наших предыдущих исследований [19]. Как и в случае ламинарной струи, на рис. 6, б (продольное сечение струи в области ее периферии) можно

наблюдать полосчатые структуры, генерируемые элементами шероховатостей, расположенными на выходе соплового аппарата. Картины визуализации дымом поперечных сечений турбулентной круглой струи на различных расстояниях от среза сопла вниз по потоку представлены на рис. 6, в. Видно, что, хотя картина течения сильно зашумлена, можно наблюдать как кольцевые вихри, так и полосчатые структуры на периферии струи при $x = 15, 22$ мм. При $x = 45, 60$ мм и далее вниз

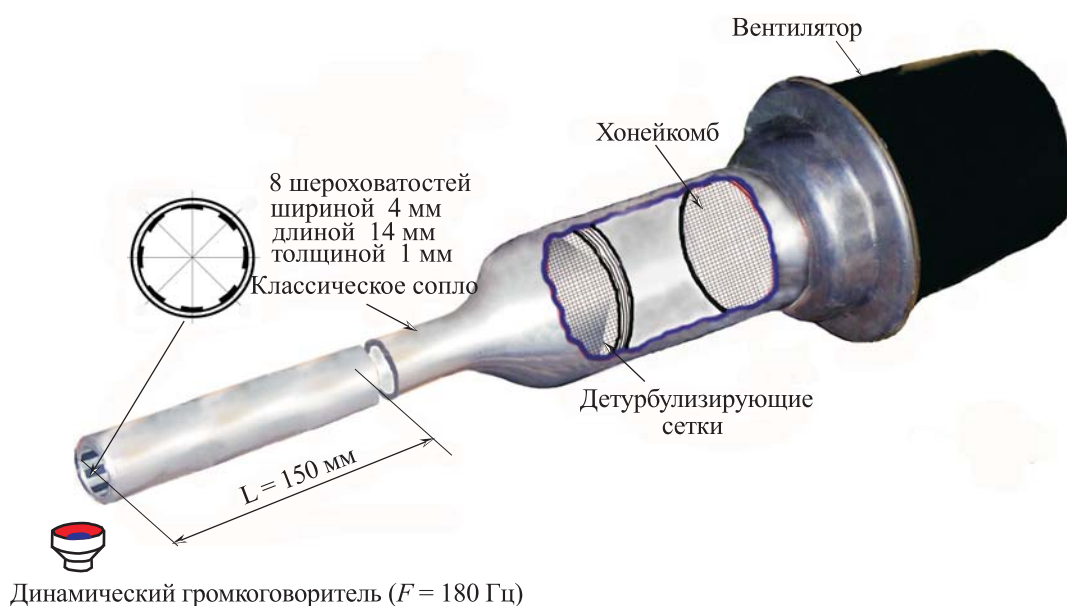


Рис. 3. Вид установки для реализации ламинарной круглой струи

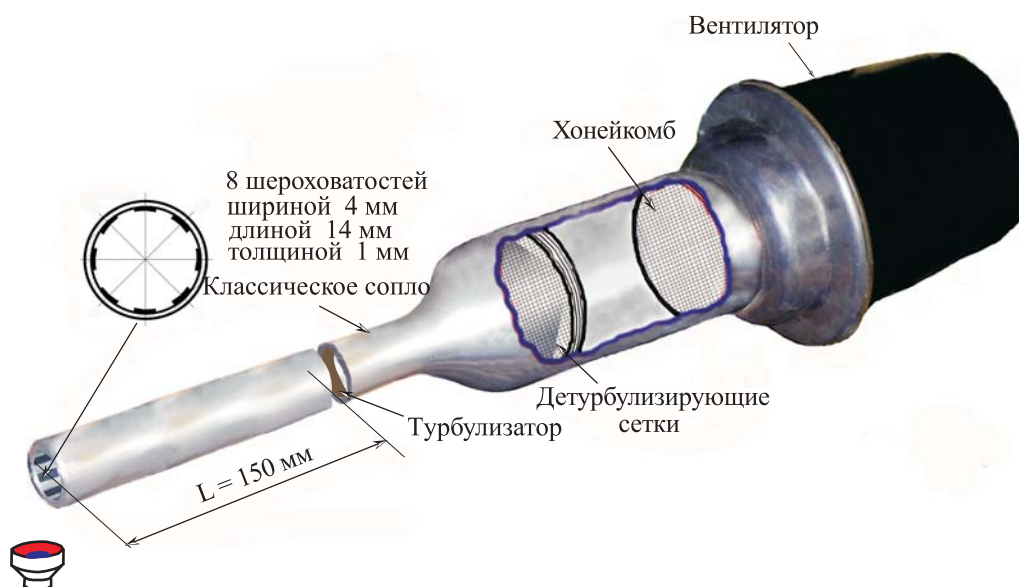


Рис. 4. Вид установки для реализации турбулентной круглой струи

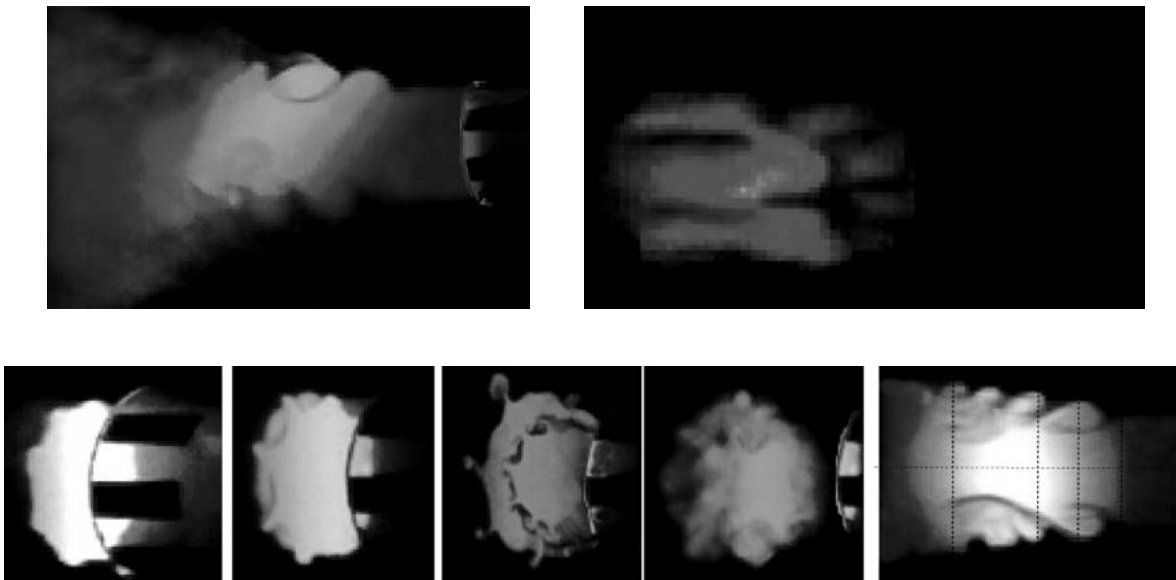


Рис. 5. Картины дымовой визуализации ламинарной круглой струи: *a* – общий вид струи; *б* – полосчатые структуры в струе; *в* – поперечные сечения струи на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла, скорость потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 5333$)

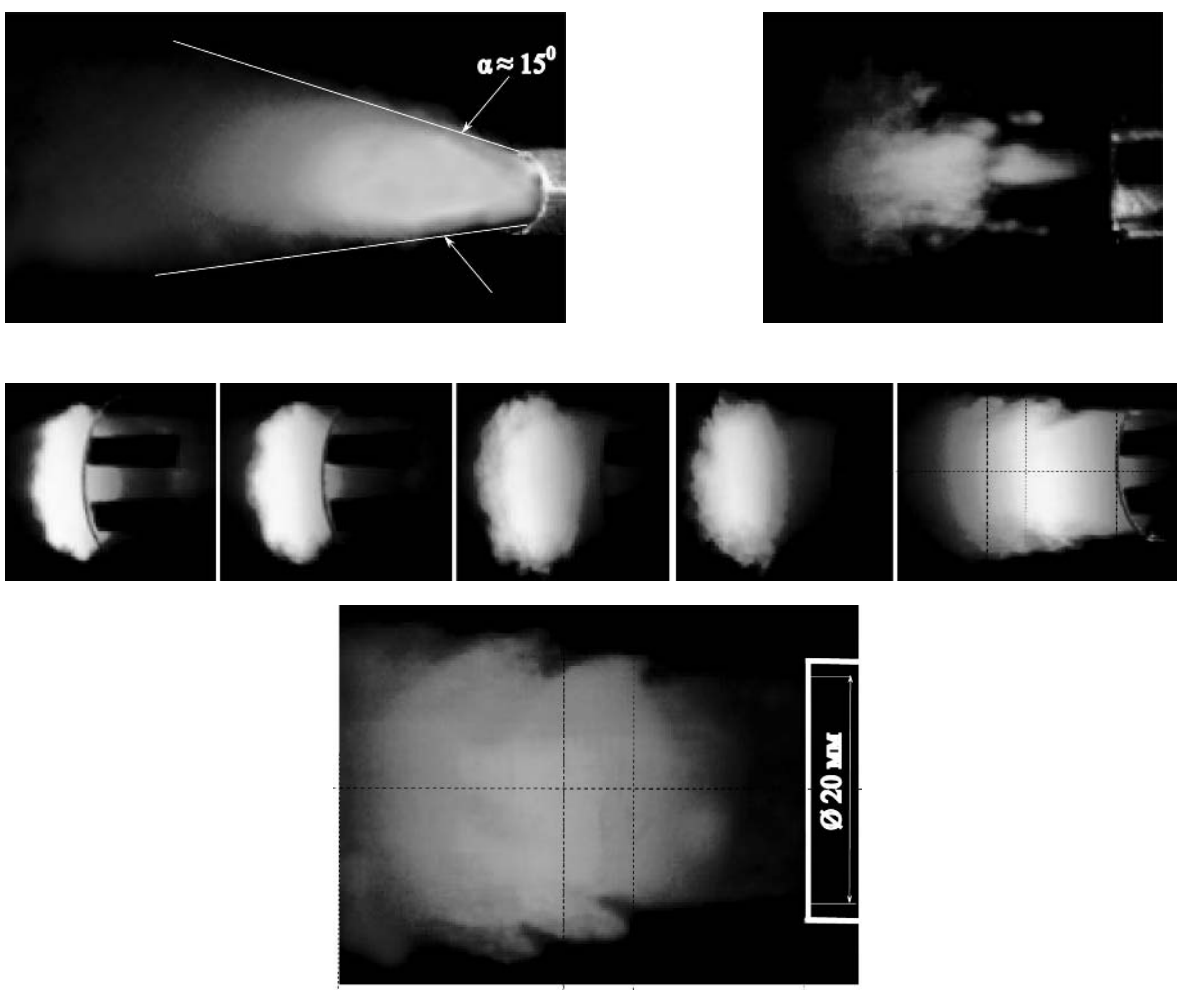


Рис. 6. Картины дымовой визуализации турбулентной круглой струи: *a* – общий вид струи; *б* – полосчатые структуры в струе; *в* – поперечные сечения струи на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла; *г* – продольное сечение струи вблизи среза сопла, скорость потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 5333$)

по потоку картина течения отражает турбулентное состояние течения. Для большей наглядности представления о наличии кольцевых вихрей в турбулентной круглой струе картина течения вблизи среза сопла показана в более крупном масштабе на рис. 6, з.

Как и в случае ламинарной струи, на рис. 6, б (продольное сечение струи в области ее периферии) можно наблюдать полосчатые структуры, генерируемые элементами шероховатостей, расположенными на выходе соплового аппарата. Картины визуализации дымом поперечных сечений турбулентной круглой струи на различных расстояниях от среза сопла вниз по потоку представлены на рис. 6, в. Видно, что, хотя картина течения сильно зашумлена, можно наблюдать как кольцевые вихри, так и полосчатые струк-

туры на периферии струи при $x = 15; 22$ мм. При $x = 45; 60$ мм и далее вниз по потоку картина течения отражает турбулентное состояние течения. Для большей наглядности представления о наличии кольцевых вихрей в турбулентной круглой струе картина течения вблизи среза сопла показана в более крупном масштабе на рис. 6, з.

Можно отчетливо наблюдать, хотя и зашумленных, три кольцевых вихря Кельвина – Гельмгольца на выходе из сопла. Таким образом, визуализация течения ламинарной и турбулентной круглой струи показывает, что механизм развития данных течений в обоих случаях связан с образованием когерентных вихревых структур (кольцевых вихрей и полосчатых структур) и их взаимодействием. Однако, чтобы выявить дан-

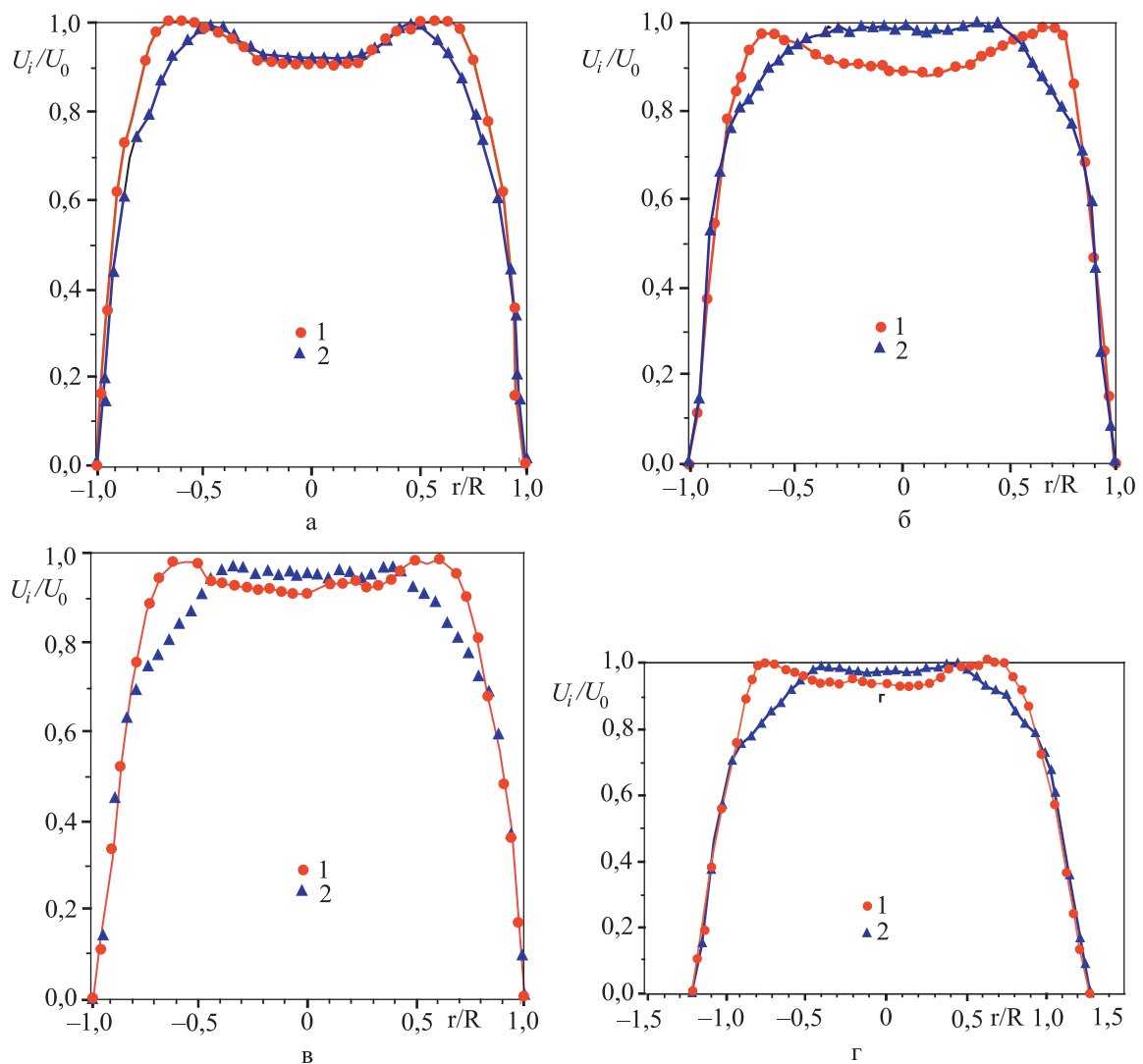


Рис. 7. Распределения скорости в поперечном сечении круглой ламинарной (1) и турбулентной (2) струй на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала (а, б, в, г – при $x = 1; 2; 5; 20$ мм соответственно), скорость потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 5333$)

ную закономерность именно для турбулентной струи, которая обычно реализуется при достаточно больших скоростях потока, где из турбулентного шума достаточно проблематично выделить какие-либо естественные когерентные структуры, в данном эксперименте с этой целью были предприняты некоторые меры. Во-первых, эксперименты проведены в контролируемых условиях с искусственным возбуждением как полосчатых структур (шероховатости), так и кольцевых вихрей (акустика) и синхронизацией термоанемометрических измерений и визуализированной информацией частотой акустического воздействия. Во-вторых, была выбрана минимальная скорость потока (4 м/с) с целью увеличения пространственного разрешения процесса, а турбулизация течения, в данной ситуации, достигнута с помощью ее искусственного возбуждения турбулизатором и удлинения классического сопла на 150 мм, обеспечивающего нарастание турбулентного пограничного слоя в канале.

Как уже отмечалось выше, были проведены термоанемометрические измерения распределений скорости и пульсаций скорости

в поперечных сечениях ламинарной и турбулентной струй на различных расстояниях от среза сопла вниз по потоку. На рис. 7 показано сравнение профилей скорости для ламинарной и турбулентной струи, измеренных на расстоянии 1; 2; 5; 20 мм от среза сопла.

Видно, что профили скорости турбулентной струи во всех случаях имеют тенденцию их искажения от «ударных» профилей скорости ламинарной струи в сторону приближения к турбулентной форме распределения скорости. Тем не менее, сказать, что профили скорости для турбулентной струи уже полностью сформированы, еще нельзя. Однако о характере турбулентного состояния течения в струе можно отчетливо судить по распределениям пульсаций скорости в поперечных сечениях ламинарной и турбулентной струй на различных расстояниях от среза сопла вниз по потоку на рис. 8. Здесь представлены сравнения профилей пульсаций скорости для ламинарной и турбулентной струи, измеренные на расстоянии 1; 2; 5; 20 мм от среза сопла.

Видно, что уровень пульсаций скорости, измеренный в широкой полосе частот, для ламинарной струи составляет примерно 0,5 %

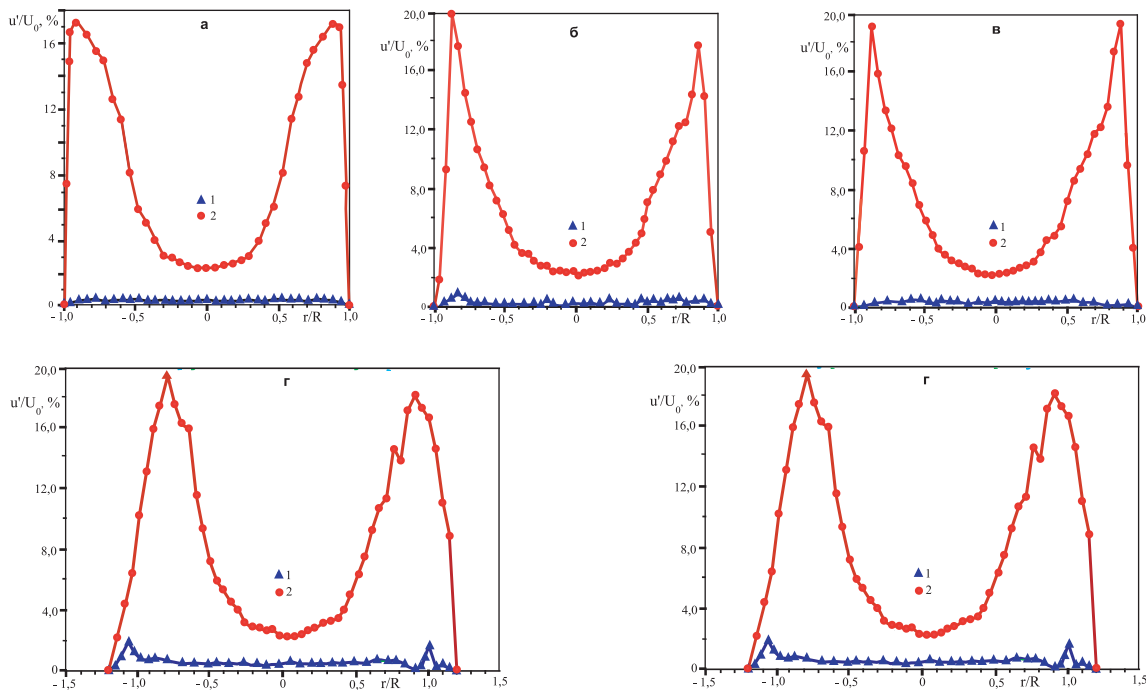


Рис. 8. Распределения пульсаций скорости в поперечном сечении круглой ламинарной (1) и турбулентной (2) струй на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала (а, б, в, г – при $x = 1; 2; 5; 20$ мм соответственно), распределение пульсаций скорости в поперечном сечении круглой ламинарной струи (д – при $x = 60$ мм) скорость потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 5333$)

U_0 во всем диапазоне измерений за исключением появляющихся пиков пульсаций скорости с амплитудой порядка 2 % U_0 в позициях сдвигового слоя струи при $x = 20$ мм. Резкий всплеск уровня амплитуды пульсаций скорости в позициях сдвигового слоя до примерно 18 % U_0 можно наблюдать на рис. 8, д. В данном случае ламинарная струя турбулизовалась и уровень интенсивности возмущений в слое сдвига практически вышел на уровень интенсивности пульсаций скорости, наблюдаемый в турбулентной струе (см. рис. 8, а-з). В целом, следует отметить, что, несмотря на незначительные изменения в распределениях скорости поперек ламинарной и турбулентной струи, максимальный уровень интенсивности пульсаций скорости турбулентной струи в слое сдвига почти в 40 раз превышает аналогичную характеристику течения в ламинарной струе

(см. рис. 8, а-з). В ядре турбулентной струи уровень пульсаций скорости снижается до 3 % U_0 , что превышает уровень пульсаций скорости в ядре ламинарной струи в 6 раз. Таким образом, можно утверждать, что в данном эксперименте реализованы при одной скорости потока ламинарное и турбулентное течение в круглой струе. Причем турбулентная струя реализована непосредственно на выходе из сопла, на что указывают распределения пульсаций скорости в поперечном сечении струи в различных позициях вниз по потоку от среза сопла (см. рис. 8) и характеристики развития чисто турбулентной струи, представленные в работе [19].

Восприимчивость ламинарной и турбулентной струи к акустическим возмущениям

Проведены экспериментальные исследования по восприимчивости ламинарной и

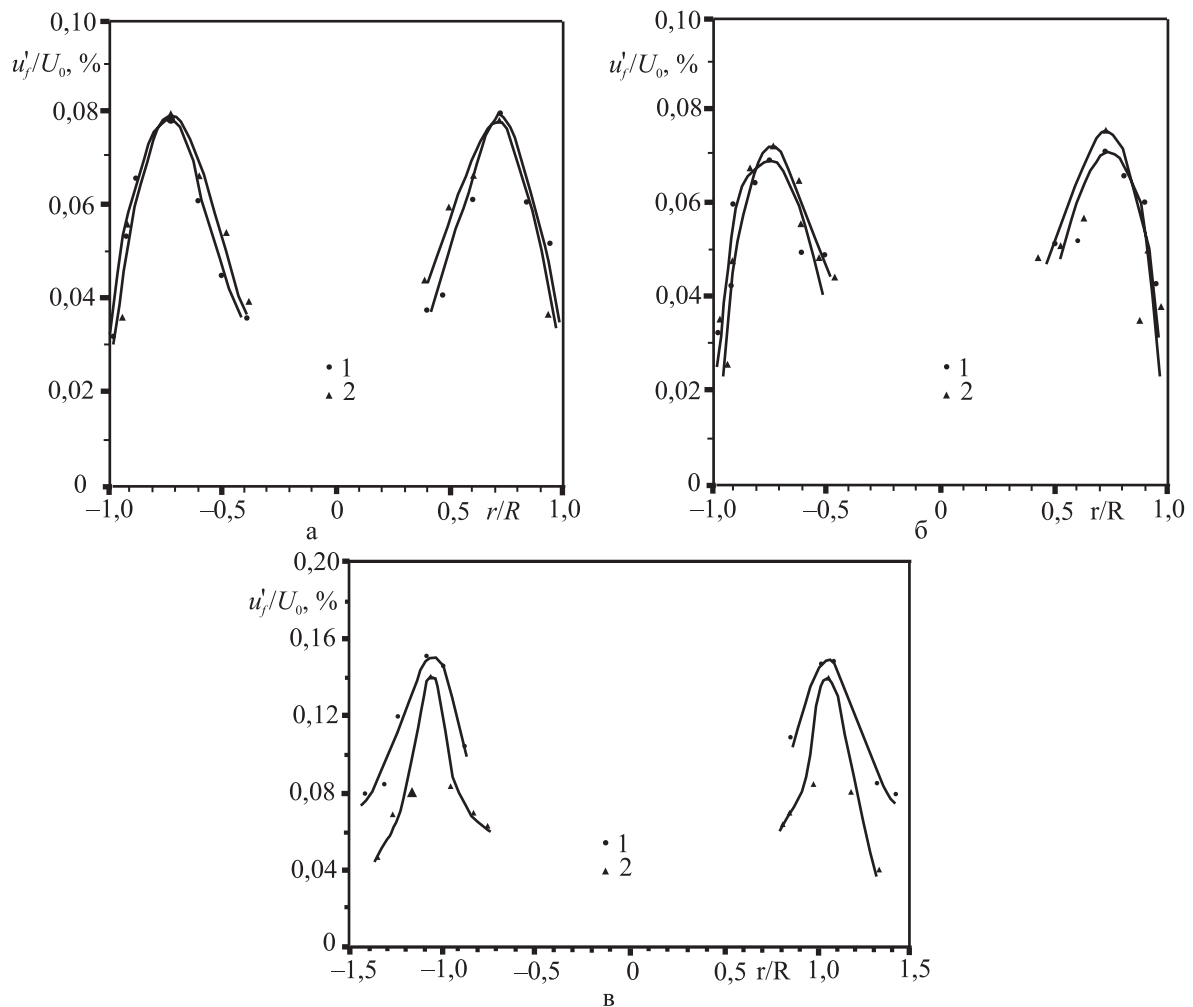


Рис. 9. Распределения пульсаций скорости в поперечном сечении круглой турбулентной (1) и ламинарной (2) струй на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала (а, б, в – при $x = 2; 5; 20$ мм соответственно), $U_0 = 4$ м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 5333$)

турбулентной струй к акустическим возмущениям. С этой целью струи подвергались воздействию акустических возмущений малой интенсивности, генерируемых динамическим громкоговорителем на частоте $F = 180$ Гц. Динамик располагался вблизи среза сопла, и направление акустического излучения осуществлялось в поперечном к струе направлении. Акустические возмущения преобразовывались в гидродинамические возмущения на срезе сопла и представляли собой когерентные структуры (кольцевые вихри), следующие друг за другом с частотой источника возмущений, т. е. с частотой $F = 180$ Гц. Процесс измерений был синхронизован с частотой схода вихрей. Осредненные по ансамблю осциллограммы (до 50 реализаций), получаемые в ходе термоанемометрических измерений, давали представление о величине интенсивности возбужденных акустикой возмущений как в ламинарной, так и турбулентной струе. Результаты измерений представлены на рис. 9.

Следует отметить, что результаты измерений, представленные на рис. 9, относятся лишь к измерениям в областях максимального уровня пульсаций скорости, т. е. в слое сдвига, где наблюдается максимальная интенсивность когерентных структур (кольцевых вихрей). Из графиков видно, что интенсивности пульсаций скорости возмущений, развивающихся в ламинарной и турбулентной струях, практически одинаковы и составляют, примерно, $0,07\% U_0$ при $x = 2$ и 5 мм и несколько выше $0,15\% U_0$ при $x = 20$ мм. Уровень интенсивности возмущений достаточно низок, что указывает на линейную стадию их развития. В целом результаты измерений показывают, что восприимчивость как ламинарной, так и турбулентной струй к акустическим возмущениям малой интенсивности одинаковая, процесс линейный и это еще раз подтверждает, что механизм развития данных типов течения идентичен в общих чертах.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований механизма возникновения и развития ламинарной и турбулентной круглых струй можно сделать следующие основные выводы:

1. Показано, что механизм возникновения и развития когерентных структур в ла-

минарной и турбулентной струях идентичен в общих чертах и связан с возникновением и развитием когерентных структур типа кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца, полосчатых структур и их взаимодействием в обоих типах течения.

2. Установлено, что характеристики восприимчивости ламинарной и турбулентной струй к акустическим возмущениям близки.

Список литературы

1. *Abid M.* Simulation numeriques directes de la dynamique de transition tridimensionnelle des jets axisymetriques: Ph. D. thesis, Ecole Normale Superieure de Paris. 1993.

2. *Brancher P., Chomaz J. M., Huerre P.* Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets // *Phys. Fluids*. 1994. Vol. 6.

3. *Metcalf R. W., Orszay S. A., Brachet M. E. et al.* Secondary instability of a temporally growing mixing layer // *J. Fluid Mech.* 1987. Vol. 184.

4. *Crow S. C., Champagne F. H.* Orderly structure in jet turbulence // *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 48. P. 547–591.

5. *Bernal L. P., Roshko A.* Streamwise vortex structure in plane mixing layers // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 170.

6. *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.

7. *Liepmann D., Gharib M.* The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // *J. Fluid Mech.* 1992. Vol. 245. P. 643–668.

8. *Monkewitz P. A., Lehmann B., Barsikow B., Bechert D. W.* The spreading of self-excited hot jets by side jets // *Phys. Fluids*. 1989. A 1.

9. *Monkewitz P. A., Pfizenmaier E.* Mixing by side jets in strongly forced and self-excited round jets // *Phys. Fluids*. 1991. A 3.

10. *Горлин С. М., Слезингер И. И.* Аэромеханические измерения (методы и приборы). М.: Наука, 1964. 720 с.

11. *Копьев В. Ф., Чернышев С. А.* Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // *Успехи физических наук (УФН)*. 2000. Т. 170, № 7.

12. *Yule A. J.* Large-scale structure in the mixing layer of a round jet // *J. Fluid Mech.* Vol. 89. P. 413–432.

13. Lau J. C., Fisher M. J. The vortex-street structure of «turbulent» jets // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 67. P. 299–337.

14. Козлов В. В., Грек Г. Р., Лефдаль Л. и др. Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (обзор) // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 2. С. 62–76.

15. Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р. Влияние продольных поперечных структур на процесс турбулизации круглой струи // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.

16. Hussain A. K. M. F. Coherent structures and turbulence // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 173. P. 303–356.

17. Grinstein F. F., Gutmark E. J., Parr T. P. *et al.* Streamwise and spanwise vortex interaction in a circular reacting jet-an experimental

and computational study // Turb. Shear Flows X, Penn. State. 1995.

18. Citrinity J. H., George W. K. Reconstruction of the global velocity field in the axisymmetric mixing layer utilizing the proper orthogonal decomposition // J. Fluid Mech. 2000. Vol. 418. P. 137–166.

19. 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 (в печати).

Материал поступил в редколлегию 18.12.2007