УДК 532.525.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СТРУКТУР В СТРУЯХ

Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Грек Г.Р.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН,. Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-3108312 мол_а)

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований механизмов возникновения и развития продольных вихревых структур в круглой, плоской и плоской пристенной струях при помощи методов визуализации и термоанемометрии в “естественных” и контролируемых условиях. Стационарные продольные структуры вводились в поток шероховатостями, которые были расположены на кромке сопла. Исследовано влияние числа Рейнольдса и частоты акустического воздействия на генерацию и характеристики продольных возмущений в струйных течениях. Установлен механизм взаимодействия двумерной неустойчивости Кельвина − Гельмгольца с продольными структурами, который представляет собой трехмерную эволюцию двумерных возмущений на неоднородностях потока (продольных структурах), развивающихся в сдвиговом слое струи. Данный процесс приводит к возникновению азимутальных “лучей”, представляющих собой образования типа Λ − структур, равномерно распределенных по всему периметру кольцевого вихря. В области “головок” Λ − образных вихрей идет интенсивный процесс смешения струи с окружающим ее газом, что приводит к дополнительному расширению струи и ее турбулентному разрушению вниз по потоку. Показано, что акустическое воздействие приводит к изменению периодичности следования двумерных вихрей Кельвина − Гельмгольца, их масштабов и интенсификации процесса смешения струи с окружающим газом.

ВВЕДЕНИЕ

Физика смешения в струях представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Интенсивность и однородность перемешивания имеют большое влияние на эффективность сгорания, коэффициент теплопередачи, формирование отработанных веществ и шум струи. Также струи могут использоваться, например, для охлаждения лопаток газовых турбин и различных электронных устройств, для управления пограничным слоем.

В ламинарных струях профили средней скорости перегибные, что приводит к формированию вихрей Кельвина − Гельмгольца, которые являются основной неустойчивостью слоев сдвига. Нелинейная стадия характеризуется насыщением амплитуды и спариванием вихрей из-за резонанса возмущений с суб − и супергармониками. Дальнейшее развитие нелинейных структур часто сопровождается появлением продольных (вытянутых по потоку) вихревых структур. Их формирование обычно связывают с так называемой вторичной трехмерной неустойчивостью вихрей Кельвина − Гельмгольца. Эксперименты показывают, что динамика этих структур играет важную роль в процессе смешения в дальнем следе струи.

Другие продольные возмущения, которые часто могут развиваться в слое сдвига струи, возникают за неровностями поверхности сопел [1]. Они представляют собой области квазистационарных трехмерных деформаций преимущественно продольной скорости в сдвиговом потоке, имеющих характерный вид “полосок” на картинах визуализации. Причина их возникновения не связана с вторичной неустойчивостью вихрей Кельвина − Гельмгольца. Эти структуры возникают в

результате эффектов установления при развитии компактных трехмерных возмущений нормальной компоненты скорости даже малой амплитуды. Такие продольные структуры подвержены интенсивному взаимодействию с другими возмущениями потока, например, с волнами неустойчивости, что, как правило, ускоряет турбулизацию течения [2]. Эта особенность делает продольные структуры перспективным агентом для улучшения смешения и управления течением в струях.

Продольные структуры в пристенных потоках предмет исследования множества работ. В тоже время, исследования процесса возникновения развития продольных структур в струйных течениях начаты лишь недавно и проводились только в "естественных" условиях, без возможности их контроля.

ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В КРУГЛОЙ СТРУЕ

Схема струйной установки показана на рис. 1. Поток воздуха в канале струйной установки создавался с помощью вентилятора, скорость струи на выходе из сопла составляла в данном эксперименте U_0 = 4 м/с ($Re = U_0 \times d / \nu = 10600$) при диаметре выходного сопла d = 40 мм, кинематическая вязкость воздуха $\nu = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ м^2/с. Дымовая визуализация осуществлена с помощью подачи в струйную установку со стороны вентилятора дыма, генерируемого дымовым генератором. Развитие визуализированной дымом струи и ее структура записывались на цифровую видеокамеру (9) как в общем виде, так и в ее продольном и поперечном сечениях с помощью подсветки сечений узким (толщиной 0,5 мм) лазерным ножом (7) в различных координатах вдоль и поперек струи. Акустическое воздействие на струю создавалось с помощью динамического громкоговорителя (8), на который подавался синусоидальный электрический сигнал различной частоты и интенсивности от звукового генератора. С помощью акустики также синхронизовался сход кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца с моментами включения инфракрасного лазера для стробоскопирования динамики взаимодействия кольцевых вихрей с продольными структурами и возможности записи этого процесса на видеокамеру (9). Видеокамера фиксировала картину течения с акустическим воздействием и без него.

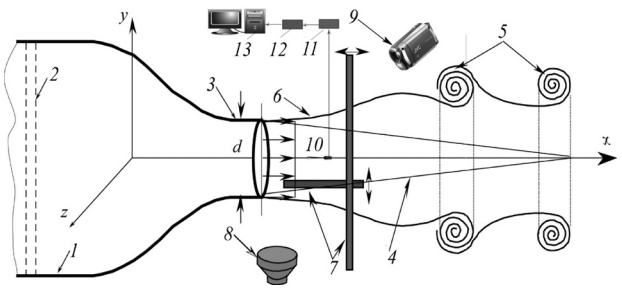

Рис.1 Схема эксперимента.

Термоанемометрические измерения в струе проведены с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. Термоанемометр измерял среднюю по времени продольную компоненту скорости U и пульсации скорости u'. Датчик (10) с проволочкой из золоченого вольфрама длиной 1 мм и диаметром 5 mm с коэффициентом перегрева 1,8 калибровался в свободном потоке. Сигнал с датчика (10) поступал в термоанемометр (11), затем подавался на аналого-цифровой преобразователь АЦП (12), и далее в компьютер (13), где данные измерений накапливалась 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=8, 12, 22 и 32 мм. 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). Текущая координата измерений от среза сопла вниз по потоку – x.

Распределения средней (U) и пульсационной (u') составляющих скорости на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла показаны на рис. 2 (1 – 8 мм; 2 – 12 мм; 3 – 22 мм; 4 – 32 мм, Re = 10600). Распределение средней скорости демонстрирует наличие узкой области мощного градиента на периферии струи и обширной области практически безградиентного течения в ядре струи. Данный факт является одним из основных причин генерации кольцевых вихрей (вихрей Кельвина – Гельмгольца) на выходе круглой струи из сопла. Наличие такого профиля скорости на срезе сопла является причиной сворачивания дыма в вихревое кольцо.

Картины дымовой визуализация круглой струи в "естественных" условиях показали

© Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Грек Г.Р.

наличие другого вида неустойчивости – продольных структур.

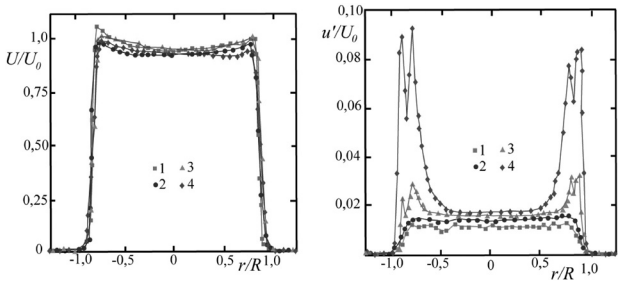

Рис.2 Распределение средней (U) и пульсационной (u') составляющей продольной компоненты скорости. на различных расстояниях от среза сопла.

Из-за радиальных колебаний, которым подвержены продольные структуры, естественные продольные структуры были воспроизведены искусственно с помощью наклеенных на внутреннюю поверхность сопла (вблизи выхода) элементов шероховатости, размеры которых коррелировали с масштабом "естественных" продольных структур. На рис. 3 показана дымовая визуализация круглой струи: общий вид, поперечное сечение (слева) и продольные сечения в области "головок" азимутальных вихревых структур (R1) и их "ног" (R2) (справа).

На общем виде можно наблюдать два кольцевых вихря Кельвина – Гельмгольца. Визуализация поперечного течения в круглой струе демонстрируют наличие азимутальных "лучей", равномерно распределенных по ее периферии. Эти "лучи" указывают на существование продольных структур, генерируемых непосредственно на выходе струи из сопла.

Трехмерное искажение двумерного кольца на локальных неоднородностях течения приводит к возникновению Λ – структур ("лучей") по всему периметру кольцевого вихря в азимутальном направлении, которые представляют собой два противовращающихся вихря.

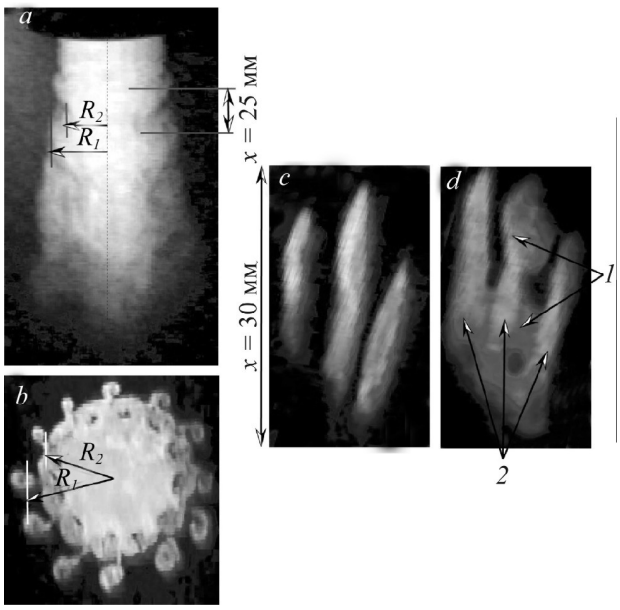

Рис.3 Дымовая визуализация круглой струи.

Гармоническое акустическое воздействие на круглую струю с амплитудой порядка 90 дБ и частотой 140 Гц приводило к интенсификации процесса развития продольных структур и их взаимодействия с кольцевыми вихрями вблизи сопла. Далее вниз по потоку процесс турбулизации струи при акустическом воздействии ускорялся по пространству, наблюдался рост амплитуды азимутальных выбросов, что указывает на то, что акустическое воздействие активизирует смешение струи с окружающим газом.

Увеличение числа Рейнольдса на выходе приводит к ускорению турбулизации струи и уменьшению характеристического размера продольных структур, что вызвано уменьшением толщины слоев сдвига. Уменьшение числа Рейнольдса ведет к обратному явлению.

ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПЛОСКОЙ И ПЛОСКОЙ ПРИСТЕННОЙ СТРУЯХ

Для реализации плоской струи использовалось плоское сопло на выходе из форкамеры. Струя визуализировалась в поперечных сечениях на расстояниях от 5 до 85 мм от сопла, а также в продольных сечениях в области сдвиговых слоев лазерным ножом толщиной около 0.3 мм.

Продольные структуры в плоской струе генерировались контролируемым образом за элементами шероховатости высотой 0,2 мм, длиной 20 мм и шириной 5 мм, расположенными на верхней кромке сопла вблизи выхода на расстоянии 10 мм друг от друга. Это расстояние было выбрано так, чтобы поперечный

размер структур составлял несколько характерных толщин слоя сдвига в струе в соответствии с параметрами продольных структур, естественно развивающихся в пристенных пограничных слоях [3].

Скорость истечения струи регулировалась в пределах от U_0 = 2 до 12,2 м/с, что соответствует числам Рейнольдса по высоте h $Re \approx hU_0/\mu = 1{,}3 \times 10^3$ и 8×10^3.

Естественная частота схода вихрей Кельвина − Гельмгольца характеризовалась некоторой нестационарностью, которая минимизировалась генерацией контролируемых вихревых возмущений в потоке звуком частоты f =140 Гц от динамика, излучавшем по нормали к струе на расстоянии 200 мм от сопла. Прямоугольные сигналы подавались на лазер с частотой звука, причем их продолжительность и, следовательно, локализация сигнальных фронтов относительно периода генерируемых вихревых возмущений можно было менять при помощи фазовариатора, что позволяло “заморозить” наиболее интересные стадии периодических явлений в визуализируемом сечении.

Несколько кадров, полученных при визуализации поперечных сечений струи, приведены на рис. 4 (на расстоянии 5, 25, 45, 65 и 85 мм от среза сопла, слева направо). Они демонстрируют результат взаимодействия продольных структур и вихрей Кельвина − Гельмгольца: развитие периодической системы грибовидных структур вниз по потоку, которые “вырываются” из слоя сдвига в окружающее пространство.

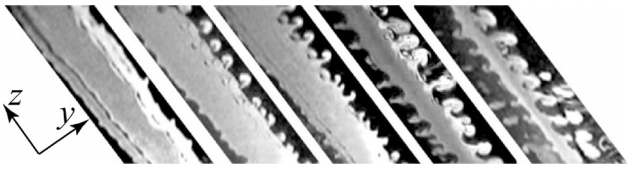

Рис.4 Визуализация поперечных сечений струи с продольными структурами.

Этот процесс имеет очевидную аналогию с развитием Λ − структур в пограничных слоях, “головки” которых выносятся во внешнее течение [4]. Хотя неровности были расположены лишь с одной стороны сопла, грибовидные структуры развиваются в обоих слоях сдвига, но имеют больший размер в слое, модулируемом элементами шероховатости.

В эксперименте также наблюдалось вихревое движение в грибовидных структурах, т.е. это вращение не синхронизировано с акустическим возбуждением и периодом вихрей. Визуализации потока, проведенные в различных продольных и поперечных сечениях, показали, что в эту область вихри Кельвина − Гельмгольца не проникают, а процесс смешения с окружающим воздухом определяется поведением этих структур. Отметим также непрерывное сужение потенциального ядра струи вниз по потоку из-за нарастания толщины слоев сдвига.

Из-за увеличения скорости истечения струи из сопла (U_0 = 2 и 4 м/с) амплитуда колебаний увеличивается, но это не приводит к качественным изменениям особенностей смешивания в рассматриваемом течении. Аналогичные результаты были получены и для других скоростей из рассматриваемого диапазона.

Плоская пристенная струя развивалась вдоль горизонтальной пластины длиной 2,1 м и шириной 3,2 м. Установка была оснащена вертикальной стенкой высотой 1,2 м, расположенной над соплом, и боковыми стенками такой же высоты. Это позволило проводить эксперимент в относительно спокойной окружающей среде. Воздух нагнетался вентилятором в стабилизационную камеру, в которой установлены: перфорированная пластина, 2 хонейкомба и сетки.

В пристенной струе выделяют две основные области – это пограничный слой вблизи поверхности и свободный слой сдвига, находящийся далеко от стенки. Измерения в ближнем поле струи в пристенной области показали, что режим течения ламинарный и профиль скорости достаточно хорошо согласуется с профилем Блазиуса. Вниз по потоку, начиная примерно с x/b = 5, высокий уровень турбулентности верхней части пристенной струи ведет к переходу во внутренней области. Во внешней части пристенной струи в интервале $0.5<x/b<2.5$ профили слоя сдвига подобны, когда обезразмерены на локальную максимальную скорость и толщину потери импульса.

При помощи дымовой визуализации потока качественно были определенны местоположение продольных структур и их характерные размеры. На рис. 5 представлены картины дымовой визуализации течения в плоской пристенной струе, где можно наблюдать продольные структуры как на виде струи вдоль потока, так и в перпендикулярном к ней направлении.

Для стабилизации трехмерных структур использовались шероховатости, которые помещались на выходе из сопла.

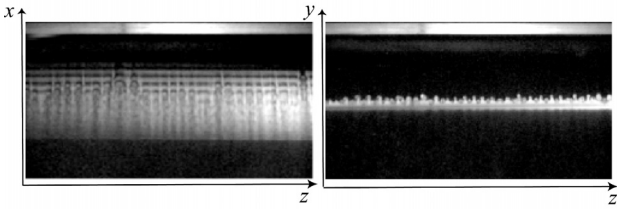

Рис.5 Дымовая визуализация струи вдоль потока (слева) и перпендикулярно потоку (справа).

В этом случае, искусственно возбужденные продольные структуры появлялись в фиксированных позициях. Достаточно высокая устойчивость структур позволила провести детальное термоанемометрическое исследование течения. Для выполнения измерений в струе использовалось дистанционно управляемое координатное устройство, которое позволяло в автоматическом режиме перемещать датчик в трех направлениях: вниз по потоку (x) с точностью 0,01 мм; в поперечном направлении (z) с точностью 0,01 мм; по нормали к поверхности (y) с точностью 0,005 мм.

Для того, чтобы ответить на вопросы: каков оптимальный размер продольных структур и как размер шероховатостей влияет на процесс генерации структур, были проведены специальные эксперименты. В эксперименте использовались 4 группы шероховатостей разного размера (5, 7,5; 10 и 12 мм), в каждой из которой находилось по 4 шероховатости одного поперечного размера. В каждой группе расстояние между шероховатостями равнялось их размеру, т.е. шероховатость с шириной 5 мм была распределена с 5 мм расстоянием и т.д. Шероховатости располагались на внутренней поверхности верхней части сопла вблизи выхода. Рис. 6 показывает распределение дефекта (серым цветом) и превышения (черным) средней скорости в верхнем слое сдвига, полученное с помощью термоанемометрической визуализации течения при Re = 5000. Измерения были сделаны в 24336 точках и обработаны с помощью программного пакета MatLab.

Шероховатости были размещены с увеличением их поперечного размера слева направо. Видно, что, на начальной стадии развития возмущений, наиболее усиливающиеся вихревые структуры развиваются позади крупных шероховатостей (10 и 12,5 мм) с предпочтительной расчетной трансверсальной длиной волны равной 20 – 25 мм. Далее вниз по потоку от координаты x = 30 мм интенсивно нарастают двумерные вихри Кельвина – Гельмгольца, приводя к изменениям характерных масштабов трехмерных полосчатых структур в сторону их уменьшения. Более точно характерные масштабы продольных структур и их коэффициенты нарастания были получены с помощью Фурье -- преобразования в трансверсальном направлении, которое подтвердило наблюдаемый в эксперименте характер поведения продольных структур.

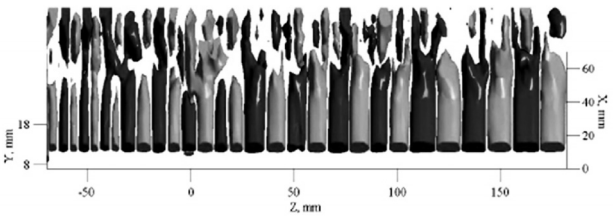

Рис.6 Изоповерхности дефекта и превышения средней скорости.

Изучалось влияние числа Рейнольдса на характеристики развития продольных структур. Были проведены термоанемометрические измерения при скорости потока струи U_0 =15 м/с (Re = 10000) и, при сравнении данных, полученных при разных скоростях, было найдено, что увеличение скорости ведет к ускорению процесса ламинарно-турбулентного перехода и уменьшению характеристического размера продольных структур. Этот факт может быть объяснен изменением размера слоя сдвига: увеличение скорости струи ведет к утончению слоя сдвига, что приводит к уменьшению размера продольных структур.

Искусственное возбуждение неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в свободном слое сдвига пристенной струи позволяет изучать влияние частоты двумерной неустойчивости на генерацию и характеристики продольных структур. При помощи динамика, расположенного близко к выходному отверстию струи, генерировались волны неустойчивости различной частоты. Было найдено, что частота вихрей Кельвина – Гельмгольца влияет на размер в поперечном направлении и амплитуду продольных вихревых структур. Взаимодействие продольных структур с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца может ускорять или затягивать процесс турбулизации струи. При частоте f = 200 Гц трехмерный эффект был менее выраженный, и турбулизация имела почти двумерный характер, тогда как при частоте f = 700 Гц трехмерность была явно выраженной и наблюдались хорошо различимые трехмерные продольные структуры в процессе перехода.

ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование круглой, плоской и плоской пристенной струй позволило отметить следующее:

- Продольные полосчатые структуры могут генерироваться непосредственно на выходе из сопла.
- Обнаружено, что механизм возникновения продольных вихревых структур представляет собой классический сценарий трехмерного искажения двумерной волны Кельвина – Гельмгольца (для круглой струи – кольцевого вихря) на неоднородностях потока (продольных структурах), развивающихся в сдвиговом слое струи. Процесс трехмерного искажения приводит к возникновению вихревых образований, которые выносятся в окружающее пространство и имеют в продольном сечении вид “лучей”, а в поперечном – грибовидных структур. В области развития продольных структур имеет место интенсивный процесс смешения струи и окружающего воздуха.
- Показано, что увеличение числа Рейнольдса на выходе приводит к ускорению турбулизации струи и уменьшению характерного размера продольных структур, что вызвано уменьшением толщины слоев сдвига. Уменьшение числа Рейнольдса ведет к обратному явлению.
- Найдено, что искусственное возбуждение двумерных волн Кельвина – Гельмгольца различной частоты оказывает влияние на размер в поперечном направлении и амплитуду продольных структур. Взаимодействие двумерной неустойчивости с трехмерными продольными структурами позволяет ускорять или затягивать процесс турбулизации струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.В., Грек Г.Р., Лефдаль Л., Чернорай В.Г., Литвиненко М.В. Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (обзор) // Прикладная Механика и Техническая Физика – 2002. – Т. 43. – N 2. – С. 62 – 76. Kozlov V.V., Grek G.R., Löfdahl L., Chernoray V.G., Litvinenko M.V. Role of localized streamwise structures in the process of transition to turbulence in boundary layers and jets (review) // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics –2002. – V. 43. – N. 2. – P. 224 – 236.
2. Demare D., Baillot F. The role of secondary instabilities in the stabilization of a nonpremixed lifted jet flame // Phys. Fluids. – 2001. – V. 13. – P. 2662 – 2669.
3. Westin K.J.A., Boiko A.V., Klingmann B.G.B., Kozlov V.V., Alfredsson P.H. Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. Part 1. Boundary layer structure and receptivity // J. Fluid Mech. – 1994. – V. 281. – P. 193 – 218.
4. Reuter J., Rempfer D. A hybrid spectral/ finite-difference scheme for the simulation of pipe-flow transition // Laminar-Turbulent Transition / Eds. H. Fasel, W.S. Saric. – Springer-Verlag. – 2000. – P. 383-390.

© Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов В.В., Грек Г.Р.