

УДК 532.525.2

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ПОЛОСЧАТЫХ СТРУКТУР НА ПРОЦЕСС ТУРБУЛИЗАЦИИ КРУГЛОЙ СТРУИ

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

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой ламинарной струи. Изучены качественные характеристики развития струи с использованием дымовой визуализации картины течения в струе и с проведением съемок видеокамерой поперечного и продольного сечений струи, подсвеченных лазерным “ножом” при стробоскопировании изображения. Показано, что полосчатые структуры могут быть генерированы непосредственно на выходе из сопла и их взаимодействие с кольцевыми вихрями Кельвина — Гельмгольца приводит к возникновению азимутальных “лучей” (Λ -структур) по типу трехмерного искажения двумерной волны Толлмина — Шлихтинга на нелинейной стадии классического перехода в пристенных течениях. Рассмотрено влияние скорости истечения струи и акустического воздействия на турбулизацию струи.

Ключевые слова: круглая струя, продольные структуры, визуализация, вихри Кельвина — Гельмгольца.

Введение. Знание физики процессов смешения струйных течений важно как с научной, так и с практической точки зрения. Как известно, процессы смешения связаны с переходом к турбулентности [1]. Эти процессы регулируют степень перемешивания газа в камерах сгорания, уровень шума самолетов и аппаратов и распространение загрязнителей в промышленных районах. В практических задачах часто необходимо решать проблему интенсификации смешения струйного течения с окружающим течением газом. От скорости и степени их перемешивания зависят эффективность горения, степень теплопереноса, формирование загрязнителя, подавление шума струи и уменьшение размеров таких устройств [1].

Продольные вихри, генерируемые в струйном течении в дополнение к азимутальным вихрям (или кольцевым вихрям Кельвина — Гельмгольца), могут существенно повлиять на процесс смешения потоков жидкости [1]. Продольные вихри в струйных течениях могут быть генерированы различными способами. Например, лепестковое сопло [2] использовалось для генерации крупномасштабных продольных вихрей в струе и является перспективным инструментом интенсификации смешения газа в струе. Оно широко применяется для регулирования выхлопов турбовентиляторных двигателей и эжекторов.

Например, в авиационных двигателях самолетов компаний “Боинг” и “Эйрбас” лепестковые сопла-смесители используются для снижения шума выхлопной струи и расхода топлива [3, 4]. Для уменьшения инфракрасного излучения боевого самолета, т. е. для обеспечения его выживаемости, лепестковые сопла-смесители используются с целью уско-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-01-00006), Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ РФ (грант № НШ-964.2003.1), Международного фонда INTAS (код проекта 00-00232) и в рамках Интеграционного проекта № 25 (2003 г.) Сибирского отделения РАН.

рения процессов перемешивания высокотемпературного, высокоскоростного газа, выходящего из двигателя, с окружающим холодным воздухом [5, 6]. Они применяются на вертолетах “Tiger” (Германия, Франция), “Comanche” (США) и самолете-невидимке F-117. В последнее время лепестковые сопла используются для интенсификации смешения топлива и воздуха в камерах сгорания, что способствует эффективному горению и снижению образования загрязнителей [7].

Впервые динамический механизм процесса смешения в лепестковом сопле-смесителе вниз по потоку изучен в [8]. Обнаружено, что такое сопло генерирует продольные вихри длиной порядка радиуса сопла. Более детальная картина течения в струе из лепесткового смесителя вниз по потоку представлена в работе [9]. Установлено, что взаимодействие вихрей Кельвина — Гельмгольца с продольными вихрями приводит к высокой степени смешения. Продольные вихри деформируют вихри Кельвина — Гельмгольца в “морщинистые” структуры и интенсифицируют процесс смешения. Из проведенных исследований следует, что искусственно генерированные лепестковым соплом крупномасштабные продольные вихри и азимутальные вихри Кельвина — Гельмгольца играют важную роль в процессе смешения ядра струи с окружающим течением.

В работе [10], в отличие от вышеизложенного, когда продольные структуры искусственно создавались за счет специальной геометрии соплового аппарата, исследовались продольные структуры, порождаемые вторичной неустойчивостью самой струи, а также их роль в процессе смешения. Как известно, в струях при определенном числе Рейнольдса вниз по потоку линейная неустойчивость Кельвина — Гельмгольца приводит к росту амплитуды возмущений, что вызывает сворачивание слоя сдвига в первичные осесимметричные кольца [11]. Наблюдаются также другие организованные вихри из-за вторичных неустойчивостей. Эти структуры возникают в виде продольных, вращающихся в противоположных направлениях вихрей, которые накладываются на вихри Кельвина — Гельмгольца. Такие вихри исследованы в плоских слоях сдвига [12, 13] и наблюдались в круглых водяных струях [14]. По мнению авторов [15, 16], формирование боковых струй в горячей струе также является результатом развития продольных вихрей. Прямым численным моделированием трехмерных круглых струй [17, 18] или слоев сдвига [19] обнаружено также присутствие вторичных вихрей. Исследования [13] показали, что возникновение продольных вихревых структур есть реакция сдвигового слоя на трехмерные возмущения вверх по потоку. Продольные вихревые структуры впервые формируются в промежутке между двумя следующими друг за другом первичными вихрями (кольцами Кельвина — Гельмгольца) и затем проникают в их ядра. На основании исследований, проведенных в [10], процесс стабилизации струйного горения можно представить следующим образом. Первичная неустойчивость струи (неустойчивость Кельвина — Гельмгольца) приводит к возникновению вихревых колец Бернара — Рошко. За счет вторичных неустойчивостей струи порождаются продольные вихри, которые выбрасываются в азимутальном направлении от ядра струи в окружающий воздух, создавая характерную лепестковую форму поперечного сечения струи. На торцах этих лепестков возникают вращающиеся в противоположных направлениях вихревые пары, которые интенсифицируют процесс перемешивания струи с окружающим воздухом. Эти области, в которых происходит активное смешение топлива с воздухом, притягивают пламя и стабилизируют процесс горения.

Таким образом, роль продольных вихревых структур в процессе развития струйных течений очевидна. В то же время вихревые структуры в струях сильно восприимчивы к шуму или акустическим возмущениям. Следовательно, искусственно генерированные возмущения можно использовать для значительного изменения и даже управления развитием струйных структур [20] (например, для снижения уровня турбулентности [21, 22]). Акустика может быть использована для изменения процесса горения и уменьшения образования

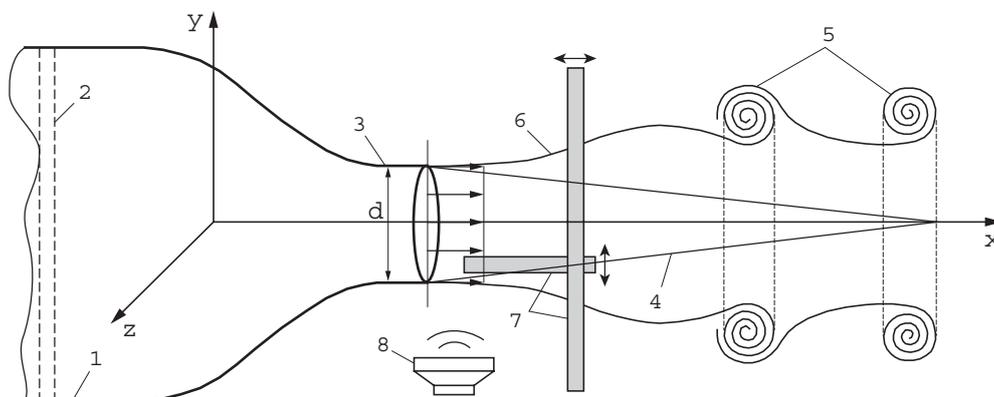


Рис. 1. Схема течения в осесимметричной круглой струе:

1 — камера; 2 — детурбулизирующие сетки; 3 — сопло; 4 — потенциальное ядро; 5 — вихри Кельвина — Гельмгольца; 6 — полосчатые структуры; 7 — позиции лазерного ножа; 8 — громкоговоритель

сажи и выбросов окиси азота [23] в струйных горелках. Эксперименты [10] показали, что акустическое воздействие на струю интенсифицирует смешение и ускоряет процесс стабилизации горения. Детальные исследования управления различными струйными течениями с помощью акустического воздействия проведены в [24].

Целью настоящей работы является исследование механизмов возникновения продольных вихревых структур непосредственно на выходе из сопла, их развития вниз по потоку и взаимодействия с вихрями Кельвина — Гельмгольца, а также акустического воздействия на эти процессы в круглой струе. Основанием для проведения данных исследований послужили результаты предыдущей работы [25], в которой показано, что продольные вихри генерируются непосредственно на выходе из сопла. Представляется важным изучить процесс возникновения, развития и взаимодействия продольных вихрей с кольцевыми.

1. Экспериментальная установка и методика измерений. Экспериментальная установка для создания струйного течения, схема которой показана на рис. 1, состоит из камеры с набором детурбулизирующих сеток, оканчивающейся профилированным соплом с круглым или плоским выходным отверстием (в данном эксперименте с круглым). Поток воздуха создавался вентилятором. На рис. 1 показана также классическая схема течения в осесимметричной круглой струе. Скорость потока на выходе из сопла составляла $U_0 = 4$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса $Re_D = U_0 D / \nu \approx 10\,600$, диаметр круглого сопла $D = 40$ мм, кинематическая вязкость воздуха $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Распределения средней и пульсационной составляющей скорости на различных расстояниях вниз по потоку от среза сопла показаны на рис. 5 в работе [25].

В данной работе представлены качественные результаты исследований, полученные с использованием дымовой визуализации течения в круглой струе. Картина течения (рис. 1) в плоскости поперечного и продольного сечения струи снималась на видеокамеру. Включение лазерного светового ножа было синхронизировано с частотой схода кольцевых вихрей, что позволяло более детально представить картину течения в струе на различных расстояниях от среза сопла как в поперечном, так и в продольном направлениях. Другой целью исследований механизма развития струи являлось изучение акустического воздействия на нее. Для этого использовался динамический громкоговоритель, на который подавался синусоидальный электрический сигнал различной частоты. Струя облучалась звуком при расположении динамика как поперек, так и вдоль нее. Видеокамера фиксировала картину течения с акустическим воздействием и без него.

2. Визуализация течения в осесимметричной круглой струе. Хорошо известен процесс развития и турбулизации круглой, осесимметричной струи. На рис. 102 в работе [26] показано, как ламинарный поток воздуха вытекает из круглой трубы при $Re = 10\,000$ и визуализируется с помощью дымовой проволоочки. Во внешней области струи развиваются осесимметричные колебания (неустойчивость Кельвина — Гельмгольца), затем эта область струи сворачивается в вихревые кольца (вихри Кельвина — Гельмгольца), после чего струя внезапно становится турбулентной. Структура дымового кольца показана на рис. 77 в [26] и представляет собой туго скрученную тороидальную спираль, возникающую из-за сворачивания вихревой пелены, отрывающейся от кромок сопла. Переход ламинарной струи в турбулентное состояние обусловлен вначале первичной неустойчивостью (неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца), а затем вторичной неустойчивостью вихревых колец. На рис. 118 в работе [26] хорошо видна неустойчивость вихревого кольца, обусловленная нарастанием волн вокруг вихревого кольца, которую часто называют неустойчивостью Уиднелла. Как отмечено во введении, механизм возникновения и развития этих волн обычно объясняется взаимодействием вихрей Кельвина — Гельмгольца и продольных вихрей. Однако процесс генерации продольных вихрей в струйном течении пока не совсем ясен. Эти вихри можно искусственно генерировать с помощью специально спрофилированного сопла, либо они могут появиться в результате вторичной неустойчивости самой струи. В работе [25] показано, что продольные полосчатые структуры генерируются непосредственно на выходе из сопла в результате опрокидывания пограничного слоя (“lift-up” эффекта). Установлено также, что на этих вихрях могут развиваться вторичные высокочастотные возмущения, способствующие быстрой турбулизации струи. Механизм взаимодействия кольцевых вихрей с данными продольными структурами не изучен. В то же время механизм взаимодействия продольных вихрей, генерируемых вторичными неустойчивостями струи, с кольцевыми вихрями детально исследован в работе [10]. Авторы работы [10] показали, что между соседними кольцевыми вихрями происходит выброс продольных вращающихся в противоположных направлениях вихрей в азимутальном направлении, что приводит к интенсификации смещения струи с окружающим ее воздухом по всей периферии струи. Генерация продольных вихрей, по мнению авторов, вызвана вторичными неустойчивостями самой струи, сопровождаемой цугом кольцевых вихрей.

3. Результаты эксперимента без введения контролируемых возмущений. Картины дымовой визуализации круглой струи в естественных условиях показаны на рис. 2. На рис. 2,а видны два кольцевых вихря в области ламинарного течения, расширение струи вниз по потоку и область турбулентного течения. На рис. 2,б,в видны азимутальные “лучи”, равномерно распределенные по периферии круглой струи.

Как показано в работе [25], наличие “лучей” свидетельствует о существовании полосчатых структур, генерируемых непосредственно на выходе струи из сопла. На рис. 2,б представлена область до кольцевого вихря ($x = 13$ мм), на рис. 2,в — область кольцевого вихря ($x = 20$ мм). В последнем случае видно, что интенсивность и размеры “лучей” увеличились, что обусловлено, по-видимому, взаимодействием кольцевого вихря с полосчатыми структурами, так как кольцевой двумерный вихрь подвергается трехмерному искажению на неоднородностях потока, вызванных присутствием продольных полосчатых структур. Механизм этого искажения качественно аналогичен трехмерному искажению двумерной волны Толлмина — Шлихтинга на нелинейной стадии ее развития, когда появляются характерные трехмерные образования типа Λ -структур. В классическом эксперименте [27] Λ -структуры получены при трехмерном искажении волны Толлмина — Шлихтинга на локальных неоднородностях потока, а в данном случае в качестве локальных неоднородностей потока выступают продольные полосчатые структуры. Двумерное вихревое кольцо, проходя через область развития продольных структур, взаимодействует

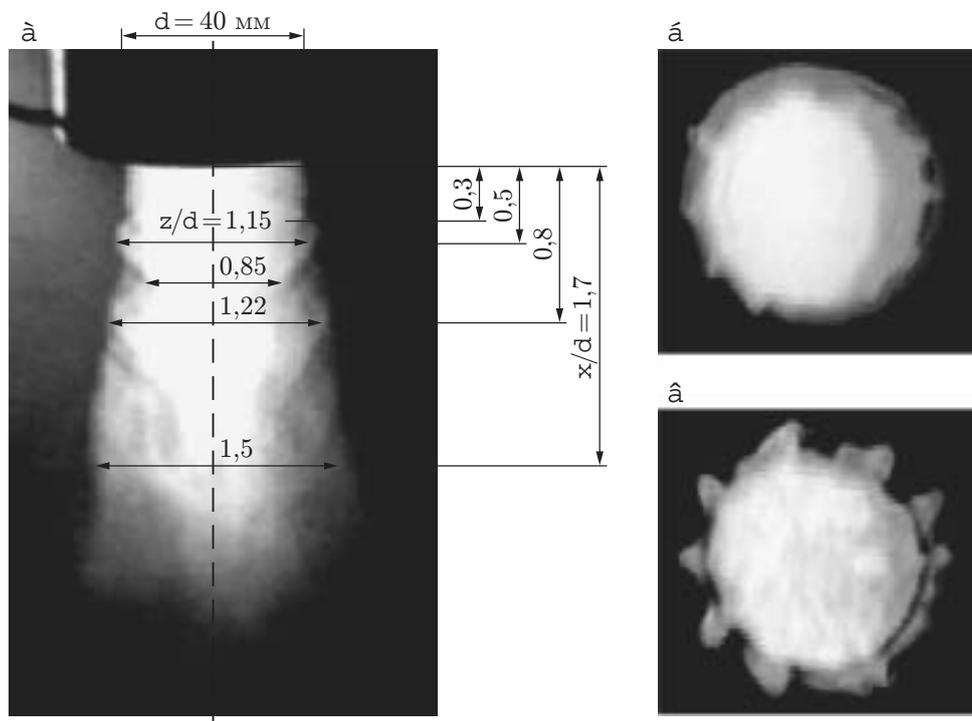


Рис. 2. Результаты дымовой визуализации круглой струи:

a — общий вид; *b*, *c* — поперечные сечения струи (*b* — $x/d = 0,3$; *c* — $x/d = 0,5$)

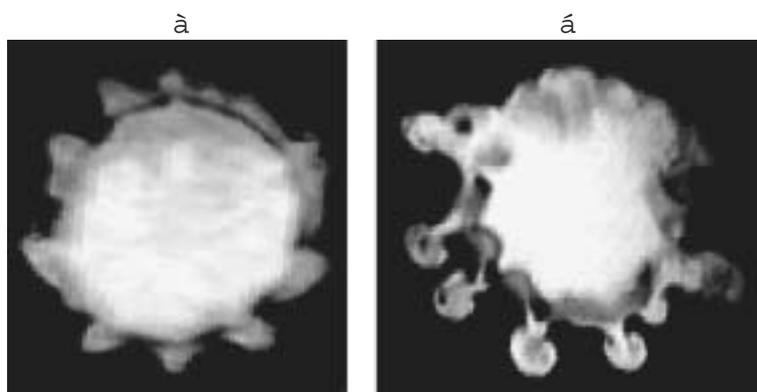


Рис. 3. Результаты дымовой визуализации поперечного сечения струи при $x/d = 0,5$ без акустического воздействия (*a*) и с акустическим воздействием (*b*)

с ними и подвергается трехмерному искажению, результатом чего являются характерные азимутальные выбросы, напоминающие Λ -структуры. Акустическое воздействие на струю приводит к интенсификации процесса взаимодействия струи с полосчатыми структурами. На рис. 3, *a*, *b* показано поперечное сечение струи при $x/d = 0,5$ без акустического воздействия и с акустическим воздействием соответственно. В последнем случае взаимодействие кольцевого вихря с полосчатыми структурами усиливается, поскольку увеличиваются размеры лучей и они принимают грибообразную форму. Грибообразная форма “лучей” при взаимодействии продольных вихрей с кольцевыми отмечена также в работе [10].

Таким образом, визуализация течения в круглой струе в естественных условиях подтверждает существование кольцевых вихрей и полосчатых структур, которые генериру-

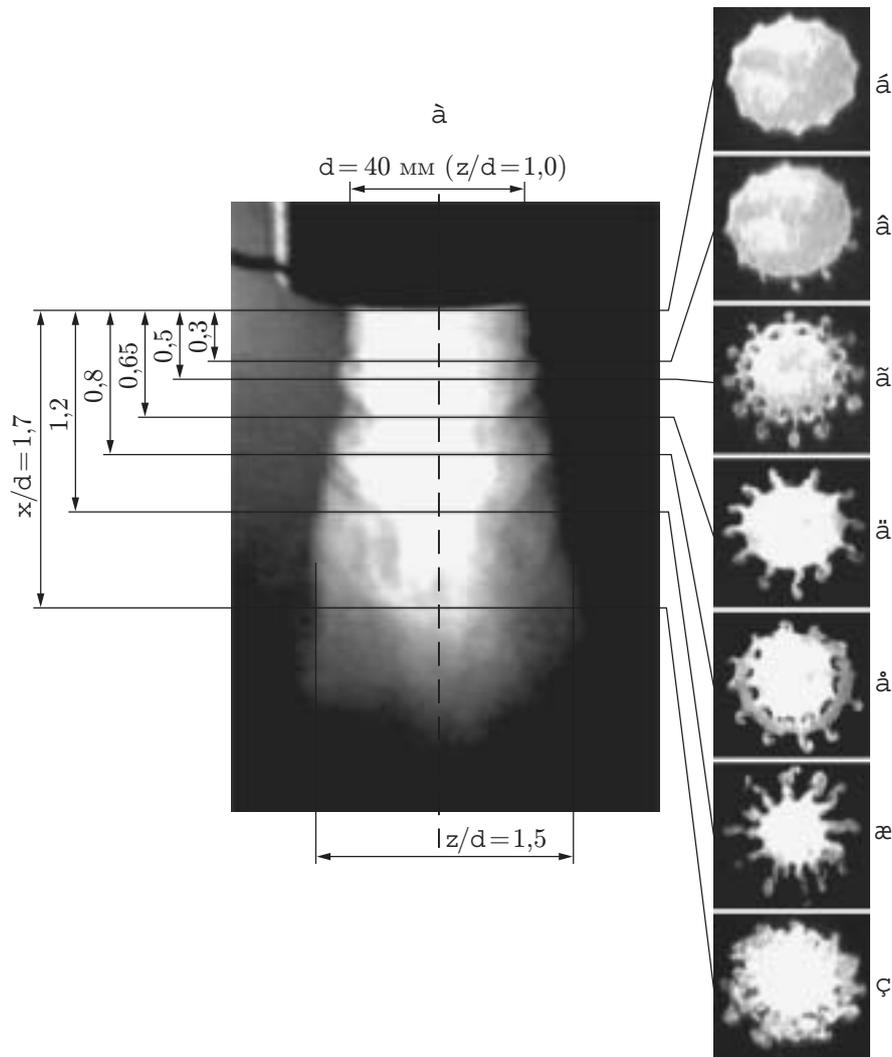


Рис. 4. Результаты дымовой визуализации круглой струи (а) и ее поперечного сечения на различных расстояниях от среза сопла (б–з)

ются непосредственно на выходе из сопла. Акустическое воздействие усиливает взаимодействие полосчатых структур с кольцевыми вихрями. Следует заметить, что полосчатые структуры подвержены воздействию радиальных колебаний, что затрудняет наблюдение и измерение структуры течения. Поэтому естественные полосчатые структуры воспроизводились искусственно с помощью наклеенных на внутреннюю поверхность сопла (вблизи выхода) 12 элементов шероховатости высотой 0,2 мм и шириной 5 мм. Размеры шероховатостей коррелировали с масштабом естественных продольных структур.

4. Результаты эксперимента с введением контролируемых возмущений.

Рассмотрим более подробно течение в струе в поперечном и продольном направлениях при введении контролируемых возмущений. Визуализационные картины данного течения на различных расстояниях от среза сопла вниз по потоку представлены на рис. 4. Видно, что вблизи сопла (рис. 4,б) внешняя граница кольцевого вихря имеет синусоидальный вид по всей окружности. При $x/d = 0,3$ (рис. 4,в) наблюдаются искажения синусоидального контура, на котором появляются азимутальные “лучи”, что обусловлено взаимодействием первого кольцевого вихря и продольных структур, генерированных на выходе из сопла.

Далее вниз по потоку $x/d = 0,5$ (рис. 4,з), в центре первого кольцевого вихря, искажение увеличивается, азимутальные выбросы (“лучи”) принимают вид узких шпилек, на концах которых появляются грибообразные структуры, подобные наблюдавшимся в [10] и идентифицированные нами как пара вихрей, вращающихся в противоположных направлениях. В области между первым и вторым кольцевыми вихрями $x/d = 0,65$ (рис. 4,д) кольцевые вихри не наблюдаются, но интенсивность “лучей” растет. При $x/d = 0,8$ (рис. 4,е) появляется второй кольцевой вихрь и наблюдается динамика в развитии “лучей”, особенно после прохождения второго кольцевого вихря при $x/d = 1,2$ (рис. 4,ж). Далее вниз по потоку происходит интенсивное смещение струи с окружающим газом за счет развития “лучевых” структур, пока вся струя не становится турбулентной при $x/d = 1,7$ (рис. 4,з). Видно, что стробоскопирование позволяет наблюдать вниз по потоку взаимодействие кольцевых вихрей с полосчатыми структурами.

Таким образом, наблюдаемый процесс обусловлен взаимодействием полосчатых структур и кольцевых вихрей вниз по потоку. Как известно, трехмерное искажение двумерной волны Толлмина — Шлихтинга на нелинейной стадии ее развития приводит к возникновению так называемых Λ -структур. В классическом эксперименте [27] с помощью локальных неоднородностей искусственно генерируются Λ -структуры, т. е. заранее задается трехмерное искажение двумерной волны. Структуры, напоминающие Λ -структуры, наблюдаются и в данном случае, но вместо двумерной волны мы имеем двумерное вихревое кольцо, а в качестве элементов шероховатости — продольные структуры. Трехмерное искажение двумерного кольца на локальных неоднородностях течения (полосчатых структурах) приводит к возникновению Λ -структур по всему периметру кольцевого вихря в азимутальном направлении. Как известно, Λ -структура представляет собой два вращающихся в противоположных направлениях вихря, заканчивающихся головкой. Наблюдаемые на визуализационных картинах грибообразные выбросы в азимутальном направлении из кольцевых вихрей представляют собой, по-видимому, головки Λ -структур. В то же время, в отличие от пограничного слоя, в котором Λ -структуры развиваются от стенки, где скорость течения нулевая, в сторону верхней границы пограничного слоя, на которой скорость становится равной скорости набегающего потока, в данном случае вынос из вихревого кольца двух вращающихся в противоположных направлениях вихрей (“ног” Λ -структуры) в азимутальном направлении происходит из области с высокой скоростью в область с нулевой скоростью окружающего струю газа. По этой причине головка Λ -структуры оказывается в области нулевой скорости, а “ноги” — в области максимальной скорости истечения струи, что приводит к отставанию головки от “ног” и вытягиванию структуры вниз по потоку. Об этом можно судить по характерной, коромыслообразной форме кольцевого вихря на рис. 4,а. Так как при визуализации поперечного сечения струи для различных координат вниз по потоку (рис. 4,б–з) можно наблюдать прохождение первого (рис. 4,з) и второго (рис. 4,е) кольцевых вихрей, то, по-видимому, лишь внешняя часть спирали кольцевого вихря подвергается трехмерному искажению при взаимодействии с полосчатыми структурами, приводя к образованию “лучей” (Λ -структур).

Результаты визуализации дымом круглой струи в области азимутальных “лучей” в продольном направлении (в направлении x) показаны на рис. 5. Съемка проведена в области головок Λ -структур (в области радиуса R_1) и области их возникновения из кольцевого вихря (в области радиуса R_2). Видно, что в области головок наблюдаются три полосы дыма, которые имеют длину, большую, чем расстояние между двумя соседними кольцевыми вихрями (рис. 5,в). Это отчетливо видно на рис. 5,г (поскольку съемка проведена в области кольцевых вихрей): вертикальные полосы дыма, визуализирующие продольные структуры азимутальных выбросов, пронизывают расстояние между соседними кольцевыми вихрями и выходят за них. Данный факт указывает на то, что продольные полосчатые

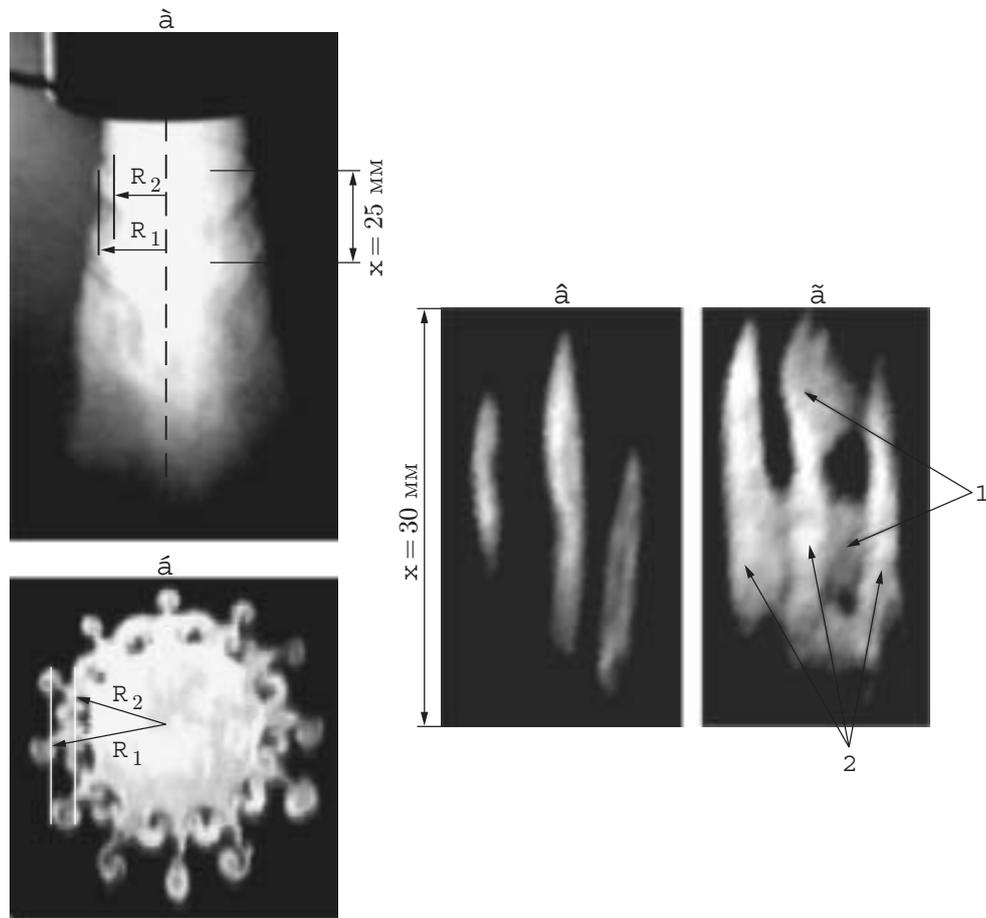


Рис. 5. Результаты дымовой визуализации круглой струи в продольном направлении в области головок азимутальных вихревых структур и их “ног”:
 а — общий вид струи; б — поперечное сечение струи; в, г — продольные сечения струи в R_1 и R_2 соответственно; 1 — местоположение кольцевых вихрей; 2 — продольные структуры

структуры, вероятно, присутствуют на всем протяжении струи, вплоть до ее турбулизации.

Зависимость динамики развития струи от скорости истечения газа. На рис. 6 представлены картины дымовой визуализации поперечного сечения струи при различных скоростях ее истечения. Описанный выше процесс турбулизации струи вниз по потоку можно наблюдать и при увеличении скорости потока, находясь на фиксированном расстоянии вниз по потоку от сопла. На визуализационных картинах показаны стадии развития (рис. 6, а, б) и взаимодействия полосчатых структур с кольцевыми вихрями (рис. 6, в–ж), динамика развития азимутальных Λ -структур (рис. 6, в–ж) и турбулизация струи (рис. 6, з).

В качестве критериев ламинарного и турбулентного течений в струе можно выделить следующие:

1) результаты термоанемометрических измерений пульсаций скорости на различных расстояниях вниз по потоку (см. рис. 5 в работе [25]) свидетельствуют о резком возрастании уровня пульсаций в струе при $x = 32$ мм (примерно в четыре раза по сравнению с уровнем пульсаций в ламинарной области при $x = 8, 12, 22$ мм), что указывает на переход течения в струе в турбулентное состояние;

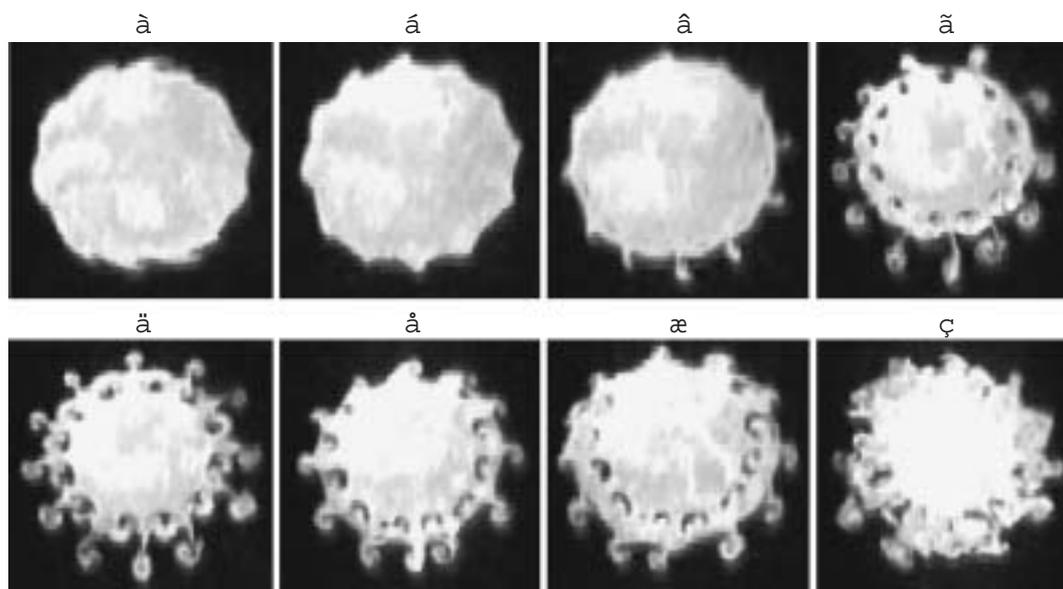


Рис. 6. Результаты дымовой визуализации поперечного сечения круглой струи при различных скоростях истечения струи:

а — $U_0 = 6$ м/с; *б* — $U_0 = 7$ м/с; *в* — $U_0 = 8$ м/с; *г* — $U_0 = 9$ м/с; *д* — $U_0 = 10$ м/с; *е* — $U_0 = 11$ м/с; *ж* — $U_0 = 12$ м/с; *з* — $U_0 = 13$ м/с ($x/d = 0,3$)

2) на визуализационных картинах (см. рис. 4,з, рис. 6,з) видна хаотичная структура течения, характерная для турбулентного течения, тогда как вверх по потоку (см. рис. 4,б–ж) и при меньшей скорости истечения (см. рис. 6,а–ж) видна упорядоченная структура потока с наличием детерминированных образований, что характерно для ламинарных и переходных течений.

Зависимость динамики развития струи при акустическом воздействии. Как отмечено выше (см. п. 3), гармоническое акустическое воздействие на круглую струю с амплитудой порядка 90 дБ и частотой 140 Гц приводило к интенсификации процесса развития полосчатых 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. Известно, что амплитуда торoidalных вихрей увеличивается [24], однако влияние акустического воздействия на возникновение, развитие полосчатых структур, генерируемых непосредственно на выходе из сопла, и их взаимодействие с кольцевыми вихрями исследованы недостаточно. В дальнейшем планируется провести количественные исследования параметрических характеристик акустического воздействия и возможности управления с помощью акустического воздействия развитием как продольных структур, так и кольцевых вихрей и их взаимодействием.

Таким образом, результаты визуализации круглой струи показывают, что ее турбулизация обусловлена процессом трехмерного искажения кольцевых вихрей на неоднородностях течения, вызванных полосчатыми структурами (продольными вихрями), что приводит к образованию Λ -структур, их эволюции и разрушению по типу разрушения ламинарного пограничного слоя в результате эволюции двумерной волны Толлмина — Шлихтинга. Сценарии трехмерной эволюции двумерных возмущений типа вихревого кольца и волны неустойчивости представлены на рис. 7.

Причинами возникновения полосчатых структур непосредственно на срезе сопла, по видимому, являются детурбулизирующие сетки в форкамере струйной установки, генерация вихрей Гертлера на вогнутой поверхности конфузора и наконец генерация полосчатых

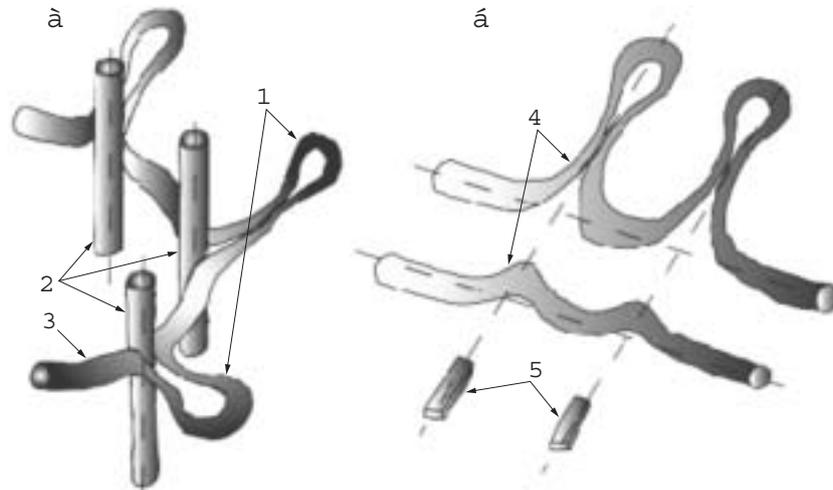


Рис. 7. Сценарии трехмерной эволюции двумерных возмущений при взаимодействии кольцевого вихря с полосчатыми структурами (а) и при трехмерной деформации волны Толлмина — Шлихтинга (б):

1 — Λ -вихри; 2 — полосчатые структуры; 3 — кольцевой вихрь; 4 — трехмерное искажение двумерной волны; 5 — элементы шероховатости

структур в пограничном слое сопла за счет эффекта опрокидывания. Все эти предположения требуют детальных исследований. Одно из таких исследований проведено в работе [28], авторами которой обнаружены продольные вихри в пограничном слое крыла при большом угле атаки. Эти вихри порождались сеткой, установленной в набегающем потоке.

Таким образом, детальная визуализация потока с использованием синхронизированного лазерного ножа показала, что продольные полосчатые структуры в круглой ламинарной струе могут генерироваться непосредственно на выходе из сопла. Также установлено, что механизм взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами представляет собой классический сценарий трехмерного искажения двумерной волны (кольцевого вихря) на неоднородностях потока (полосчатых 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 -вихрей идет интенсивный процесс смещения струи с окружающим ее газом, что приводит к дополнительному азимутальному расширению струи.

Авторы выражают благодарность А. А. Павлову за создание синхронизированного лазерного источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hu H., Saga T., Kobayashi T., Taniguchi N.** A study on a lobed jet mixing flow by using stereoscopic particle image velocimetry technique // *Phys. Fluids*. 2001. V. 13. P. 3425–3441.
2. **Zaman K. B. M. Q.** Axis switching and spreading of an jet: The role of coherent structure dynamics // *J. Fluid Mech.* 1997. V. 316. P. 1–20.
3. **Kuchar A. P., Chamberlin R.** Scale model performance test investigation of exhaust system mixers for an energy efficient engine (E3). 1980. (Paper / AIAA; N 80-0229).
4. **Presz W. M., Reynolds G., McCormic D.** Thrust augmentation using mixer-ejector-diffuser system. 1994. (Paper / AIAA; N 94-0020).
5. **Power G. D., McClure M. D., Vinh D.** Advanced IR suppresser design using a combined CFD/Test approach. 1994. (Paper / AIAA; N 94-3215).

6. **Hu H., Saga T., Kobayashi T., et al.** Research on the rectangular lobed exhaust ejector/mixer systems // Trans. Japan Soc. Aeronaut. Space Sci. 1999. V. 41. P. 187–197.
7. **Smith L. L., Majamak A. J., Lam I. T., et al.** Mixing enhancement in a lobed injector // Phys. Fluids. 1997. N 9. P. 667–672.
8. **Paterson R. W.** Turbofan forced mixer nozzle flowfield: A benchmark experimental study // Trans. ASME. J. Engng Gas Turbines Power. 1984. V. 106. P. 692–700.
9. **McCormic D. C., Bennett J. C.** Vortical and turbulent structure of a lobed mixer free shear layer // AIAA J. 1994. V. 32. P. 1852–1856.
10. **Demare D., Baillot F.** The role of secondary instabilities in the stabilization of a nonpremixed lifted jet flame // Phys. Fluids. 2001. V. 13, N 9. P. 2662–2669.
11. **Drazin P. G., Reid W. H.** Hydrodynamic stability. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981.
12. **Bernal L. P., Roshko A.** Streamwise vortex structure in plane mixing layers // J. Fluid Mech. 1986. V. 170. P. 499–519.
13. **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. V. 172. P. 231–247.
14. **Liepman D., Gharib M.** The role of streamwise vorticity in the near-field of round jet // J. Fluid Mech. 1992. V. 245. P. 643–668.
15. **Monkewitz P. A., Lehmann B., Barsikow B., Bechert D. W.** The spreading of self-excited hot jets by side jets // Phys. Fluids. 1989. N 1. P. 446–456.
16. **Monkewitz P. A., Pfizenmaier E.** Mixing by side jets in strongly forced and self-excited round jets // Phys. Fluids. 1991. N 3. P. 1356–1364.
17. **Abid M.** Simulation numeriques directes de la dynamique de transition tridimensionnelle des jets axisymetriques: Ph. D. thesis. Paris, 1993.
18. **Brancher P., Chomaz J. M., Huerre P.** Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets // Phys. Fluids. 1994. N 6. P. 1768–1775.
19. **Metcalf R. W., Orszay S. A., Brachet M. E., et al.** Secondary instability of a temporally growing mixing layer // J. Fluid Mech. 1987. V. 184. P. 207–219.
20. **Crow S. C., Champagne F. H.** Orderly structure in jet turbulent // J. Fluid Mech. 1971. V. 48. P. 547–591.
21. **Zaman K. B. M. Q., Hussain A. K. M. F.** Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation // J. Fluid Mech. 1981. V. 103. P. 133–145.
22. **Hussain A. K. M. F., Hasan M. A. Z.** Turbulence suppression in free turbulent shear flows under controlled excitation. Pt 2 // J. Fluid Mech. 1985. V. 150. P. 159–170.
23. **Chao Y. C., Yuan T., Tseng C. S.** Effects of flame lifting and acoustic excitation on the reduction of NO_x emissions // Combust. Sci. Technol. 1996. N 113. P. 49–60.
24. **Гиневский А. С., Власов Е. В., Каравосов Р. К.** Акустическое управление турбулентными струями. М.: Наука, 2001.
25. **Козлов В. В., Грек Г. Р., Лефдаль Л. 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.
26. **Ван-Дайк М.** Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986.
27. **Klebanoff P. S., Tidstrom K. D., Sargent L. M.** The three-dimensional nature of boundary layer instability // J. Fluid Mech. 1962. V. 12, pt 1. P. 1–34.
28. **Zharkova G. M., Zanin B. Y., Kovrizhina V. N., Brylyakov A. P.** Free stream turbulence effect on the flow structure over the finite span straight wing // J. Visual. 2002. V. 5, N 2. P. 169–176.