

УДК 533.6.011

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ФОРКАМЕРЫ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ

В. А. Мальцев, С. А. Новопашин, А. Л. Перепелкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено экспериментальное исследование влияния характера течения в форкамере сопла на высокочастотную границу спектра флуктуаций на границе сверхзвуковой сильнонедорасширенной струи N_2 , истекающей из круглого звукового сопла в затопленное пространство. Варьирование числа Рейнольдса течения в форкамере сопла при заданном критическом сечении производилось изменением диаметра дозвуковой области. Высокочастотная граница спектра турбулентных флуктуаций оценена по двухточечным временным корреляционным функциям, для измерения которых применена методика, основанная на молекулярном рассеянии света. В качестве источников света использовано излучение двух импульсных лазеров с регулируемой задержкой между импульсами. Из результатов экспериментов следует, что высокочастотная граница спектра турбулентных флуктуаций и сам спектр существенно изменяются в зависимости от числа Рейнольдса течения в форкамере.

Введение. Характер течения на начальном участке сверхзвуковой сильнонедорасширенной струи в основном определяется числом Рейнольдса Re , вычисленным по максимальной скорости истечения, вязкости окружающего пространства и расстоянию до диска Маха [1–3]. Течение турбулентно при $Re > 10^4$. Диапазон $10^3 < Re < 10^4$ соответствует ламинарно-турбулентному переходу, причем по мере увеличения числа Рейнольдса расстояние, на котором происходит переход к турбулентному режиму, перемещается от диска Маха к срезу сопла. В зависимости от величины шероховатости кромки сопла переход к турбулентности может осуществляться по двум различным сценариям [4]. При шероховатости кромки сопла $\delta/d > 5 \cdot 10^{-3}$ (d — диаметр сопла, δ — характерная величина шероховатости) переход к турбулентному режиму течения происходит с нарушением осевой симметрии течения в слое смещения. В этом случае сопоставление турбулентных характеристик течений для различных сопел затруднительно вследствие необходимости контроля величины шероховатости. Ламинарно-турбулентный переход происходит без нарушения осевой симметрии течения, когда длина свободного пробега молекул в окружающем пространстве становится сопоставима с величиной шероховатости ($\delta/d < 10^{-3}$) [4]. В этих условиях турбулентные характеристики определяются уровнем внешних возмущений и инкрементами роста этих возмущений в слое смещения. Часть возмущений возникает в форкамере сопла и определяется соответствующим числом Рейнольдса.

В настоящей работе исследуется влияние возмущений, возникающих в форкамере сопла, на высокочастотную границу спектра турбулентных флуктуаций на начальном участке сверхзвуковой сильнонедорасширенной струи.

Работа выполнена в рамках проекта № 274 Федеральной целевой программы интеграции высшего образования и фундаментальной науки при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01565).

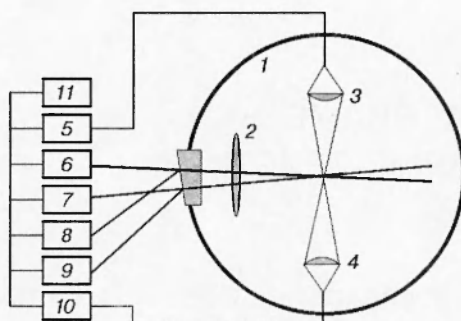


Рис. 1

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Эксперименты выполнены в вакуумной камере 1 (диаметром 1,2 м и длиной 5 м). Откачка газа осуществлялась механическим насосом НВЗ-500. Источником газа служило звуковое сопло диаметром 4,2 мм, установленное в центре камеры на трехкомпонентном микрометрическом координатном механизме. Диаметр форкамеры мог изменяться с помощью специальных вставок (40 и 80 мм). Для получения однородного по сечению форкамеры потока газа его подача осуществлялась через выравнивающий пористый фильтр, который представлял собой слой поролона толщиной 10 мм, укрепленный металлическим диском с диаметром, совпадающим с диаметром форкамеры. Толщина диска 1 мм. Серия отверстий диаметром 2 мм покрывала всю поверхность диска. Площадь, занятая отверстиями, составляла около 50 %. Расстояние между пористым фильтром и срезом сопла 75 мм. Давления в форкамере сопла и окружающем пространстве измерялись датчиками мембранного типа с погрешностью, не превышающей 0,5 %. Для изменения числа Рейнольдса давления в форкамере и окружающем пространстве изменялись пропорционально. В этих условиях положение диска Маха практически неизменно.

В экспериментах применялся метод измерения локальной концентрации газа, основанный на явлении рэлеевского рассеяния света [5]. Для измерения временных корреляций использованы две идентичные импульсные лазерные системы 6, 7 (рис. 1). Излучение твердотельных лазеров, работающих в режиме модулированной добротности, преобразовывалось во вторую гармонику нелинейно-оптическим кристаллом. Параметры излучения: длина волны 0,54 мкм, длительность излучения 20 нс, энергия в импульсе 20 мДж, частота повторения 2 Гц. Излучения лазеров фокусировались линзой 2 (фокусное расстояние 400 мм) в общую пространственную точку, расположенную в центральной области камеры. Локализация измерений определялась геометрией фокусирования и сбора рассеянных фотонов. Для условий настоящих экспериментов пространственное разрешение составило 10^{-6} см³. Пространственная область измерений представляла собой цилиндр с характерным диаметром около 100 мкм, определяемым диаметром перетяжки, и длиной 100 мкм. Изменение положения точки измерения в поле течения осуществлялось перемещением объекта исследования. Временное разрешение определялось длительностью лазерного импульса 20 нс. Время между импульсами регулировалось в пределах 0–1 мс с точностью 1 мкс. Рассеянное излучение собиралось объективами 3 и 4 и по световодам передавалось на фотозумножители 10 и 5, расположенные за пределами вакуумной камеры. Энергии опорных световых импульсов измерялись фотодиодами 8 и 9. Измерение всех интенсивностей осуществлялось зарядо-цифровыми преобразователями, выполненными в стандарте КАМАК. Для управления экспериментом и обработки результатов применялся персональный компьютер 11.

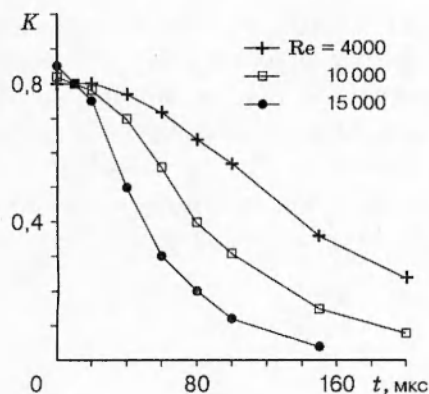


Рис. 2

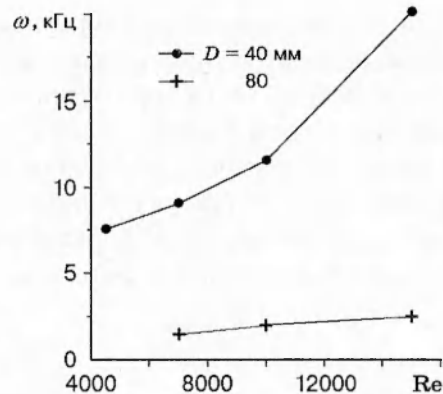


Рис. 3

Результаты и выводы. В экспериментах исследовалось течение азота. В результате проведения серии из нескольких сотен измерений определялись временные корреляции при заданной задержке между лазерными импульсами. Исследовалось истечение из звукового сопла диаметром 4,2 мм при шероховатости кромки, не превышающей 2 мкм. В этих условиях переход к турбулентности осуществляется без возникновения лепестковой структуры на границе струи (число Кнудсена, вычисленное по длине свободного пробега в окружающем пространстве и величине шероховатости, близко к единице) [4]. Диаметр форкамеры 40 или 80 мм. Эксперименты проведены при степени расширения струи 50. Диск Маха находится на расстоянии 19,9 мм от среза сопла. Измерения проведены на расстоянии 8 мм от оси струи и 18 мм от среза сопла. Эта точка для течения азота находится в слое смешения. Ось лазерного пучка направлена по радиусу струи. Измерения проведены в области первого пересечения лазерного пучка со струей. Число Рейнольдса изменялось в пределах $4000 \div 16\,000$, что соответствует турбулентному режиму течения на расстоянии 19,9 мм от среза сопла. На рис. 2 представлена нормированная временная корреляционная функция $K(t)$ форкамеры диаметром 40 мм. Хотя измерения проведены в одной пространственной точке, корреляционная функция отлична от единицы при нулевом временном сдвиге. Это связано с тем, что в экспериментах используется два независимых канала измерения при конечной величине погрешности измерений. Падение корреляций со временем свидетельствует об их хаотическом характере и турбулентном режиме течения. Спектр турбулентных флуктуаций может быть восстановлен по фурье-преобразованию корреляционной функции. Для качественного анализа будем характеризовать спектр флуктуаций его высокочастотной границей. В качестве критерия для выбора этой границы примем величину, обратную времени, при котором корреляции падают в 2 раза. В этой области реализуется наибольший градиент падения корреляционных функций, что обеспечивает наилучшую точность.

Высокочастотные границы флуктуаций ω , полученные для различных диаметров форкамеры D , приведены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что развитие флуктуаций на границе сверхзвуковой струи при переходе к турбулентному режиму течения связано с характером течения в форкамере сопла. Оценивая числа Рейнольдса течения газа в форкамере сопла при числе Рейнольдса течения в струе $Re = 10^4$, получаем величины $1,5 \cdot 10^4$ и $7,5 \cdot 10^3$ для форкамеры с диаметром 40 и 80 мм. Оба случая соответствуют турбулентному режиму течения уже в форкамере сопла. Для форкамеры диаметром 40 мм более развитый турбулентный режим приводит к увеличению высокочастотной границы спектра турбулентных

флуктуаций в слое смешения сверхзвуковой струи. Отметим, что характерная частота, определенная по диаметру форкамеры (40 мм) и скорости звука, составляет 10 кГц. Эта величина лежит в области частотного спектра флуктуаций для данной форкамеры. Для форкамеры диаметром 80 мм характерная частота составляет 5 кГц, что значительно выше наблюдаемого спектра флуктуаций для данной форкамеры. Проведенный анализ позволяет предположить, что флуктуации на границе сверхзвуковой струи связаны с усилением возмущений, возникающих в форкамере. Эти возмущения в свою очередь определяются числом Рейнольдса течения в форкамере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдуевский В. С., Иванов А. В., Карпман И. М. и др. Влияние вязкости на течение в начальном участке сильнонедорасширенной струи // Докл. АН СССР. 1971. № 1. С. 69–71.
2. Авдуевский В. С., Ашратов Э. А., Иванов А. В., Пирумов У. Г. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй. М.: Машиностроение, 1989.
3. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984.
4. Novopashin S. A., Perepelkin A. L. Axial symmetry loss of a supersonic preturbulent jet // Phys. Lett. A. 1989. V. 135, N 4/5. P. 290–293.
5. Нововопашин С. А., Перепелкин А. Л., Ярыгин В. Н. Импульсный локальный метод исследования потоков газа по рэлеевскому рассеянию света // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 5. С. 158, 159.

*Поступила в редакцию 16/I 1998 г.,
в окончательном варианте — 17/VII 1998 г.*
