

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА УЧАСТКЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА И В ОБЛАСТИ СМЫКАНИЯ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ЗОН СМЕШЕНИЯ

Маракасов Д.А., Сухарев А.А., Цвык Р.Ш.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: mda@iao.ru, sukharev@iao.ru, tsvyk@iao.ru

В работе выполнен анализ структуры пульсаций в канале сверхзвуковой струи, а также, проведен анализ спектрального состава флуктуаций интенсивности пучка, просвечивающего прикорневой участок сверхзвуковой струи. Показано, что классические механизмы развития колебаний на частоте основного дискретного тона реализуются не всегда. Показано, что турбулентность в прикорневом участке сверхзвуковой струи соответствует степенной модели с внешним масштабом порядка поперечного размера внутреннего слоя смешения и показателем, по модулю меньшим, чем у турбулентности во внешнем слое смешения. Далее, после смыкания слоев смешения, турбулентность внешнего слоя становится неотличима от турбулентности внутри канала струи.

Экспериментальные исследования по просвечиванию сверхзвуковых недорасширенных струй (СС) были проведены на Вертикальной струйной установке (ВСУ) ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск). Схема эксперимента представлена на Рис. 1.

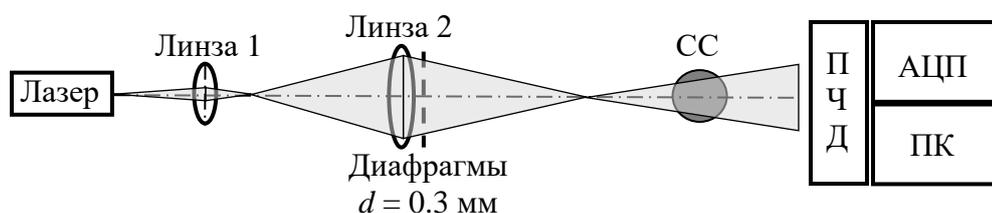


Рисунок 1 – Схема эксперимента, вид сверху.

В ходе эксперимента исследовалась СС, формирующаяся соплом Витошинского [1] диаметром 30 мм, выходящая вертикально вверх в помещении 5x5x3 м. Зондирование проводилось на высотах от 15 до 30 см над срезом сопла для струй, характеризующимся числом $NPR = P_e/P_0$, где P_e – давление в форкамере, P_0 – давление в окружающем пространстве, в диапазоне от 3 до 7, что соответствует недорасширенному режиму истечения при струйном числе Маха в диапазоне 1 – 2.5 М.

Источником излучения являлся лазер с длиной волны 0.532 мкм и выходной мощностью 500 мВт. Лазерное излучение проходит через собирающую линзу «Линза 1» с фокусным расстоянием $F_1 = 2.54$ см, преобразовываясь в быстросходящийся пучок. На расстоянии $l_1 = 90$ см за точкой перетяжки пучок расширяется до диаметра ~ 10 см, после чего проходит через собирающую линзу «Линза 2» с фокусным расстоянием 20 см. Непосредственно за линзой «Линза 2» расположена линейка горизонтально разнесенных диафрагм (диаметр 0.3 мм,

шаг 0.5 см), преобразующая излучение в систему пучков с веерообразно разнесенными горизонтальными осями. Точка перетяжки расположена на расстоянии 22 см за линзой «Линза 2». За точкой перетяжки расстояние между соседними пучками линейно растет по мере удаления от нее. Выбором расположения исследуемого объекта обеспечивается требуемое пространственное разрешение в исследуемом сечении. Линейка позиционно-чувствительных фотодетекторов помещается на достаточном удалении от точки перетяжки, таком, чтобы расстояние между соседними пучками превосходило минимально возможное 2.4 см, обусловленное конструктивными особенностями ПЧД. Прицельные параметры пучков связаны линейным соотношением с позициями диафрагм. Выбор просвечиваемого сечения на ВСУ осуществлялся с точностью ~ 0.5 мм. Регистрация отклонений диафрагмированных пучков производилась с помощью линейки из пяти ПЧД, на выходе каждого из которых снимаются три сигнала – напряжения V_x , V_y и V_z , которые пропорциональны горизонтальному и вертикальному смещению энергетического центра тяжести (ЭЦТ) распределения интенсивности излучения на чувствительном элементе детектора и полной перехваченной мощности, соответственно.

Изменение NPR позволяет варьировать характеристики струи в исследуемой области. Так, для СС с $NPR = 3$ указанный выше диапазон высот соответствует области турбулентного распада структуры течения и переходу к изобарическому режиму с сомкнувшимися слоями смешения, заполняющими все сечение СС. При увеличении NPR до 4–5 элементы пространственной структуры течения недорасширенной струи (бочки) проявлены на нижнем участке исследуемого диапазона высот и слабо заметны на верхнем. Именно здесь, вследствие выравнивания давлений в канале струи и в окружающем пространстве происходит излучение дискретных акустических тонов. При больших NPR неизобарический участок с хорошо различимыми элементами структуры СС и несомкнувшимися внутренним и внешним слоями смешения занимает весь исследуемый диапазон высот. При измерениях ось СС располагалась на расстоянии 33 см от линейки диафрагм, приемное устройство находилось на расстоянии 90 см от оси струи, что обеспечивало разрешение по прицельному параметру 0.25 см. (Рис. 2).

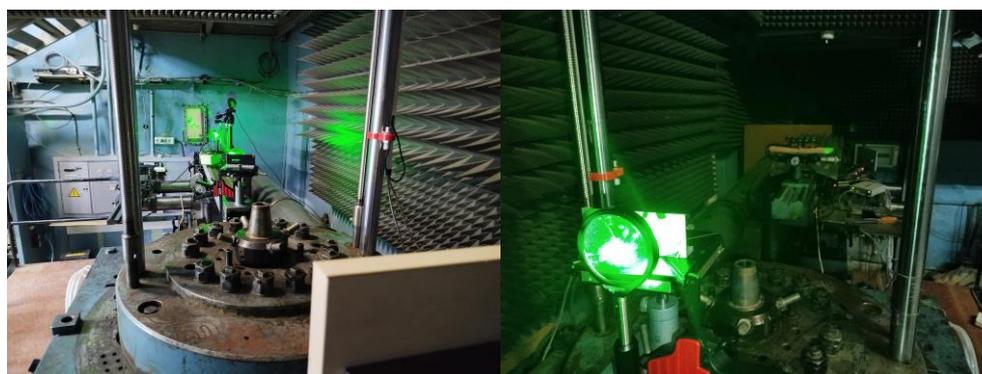


Рисунок 2 – Фотография эксперимента на ВСУ ИТПМ СО РАН.

Для изучения структуры пульсаций в канале СС и связи пульсаций плотности и акустических волн, генерируемых струей, использовался микрофон, располагавшимся в 50 см от оси струи на высоте 20 см от среза сопла. Измерения проводились при значениях $NPR = 3 - 7$. Рассчитывались спектры пульсаций звуковой волны и угловых смещений диафрагмированных пучков, просвечивающих СС. Индикатором появления скрич-тона являлось кратное (более чем в 3 раза) превышение средней мощности в полосе частот шириной 100 Гц по сравнению с соседними полосами той же ширины. Дискретные тоны были зафиксированы для всех исследовавшихся значений NPR . Характер спектра вблизи максимумов – пакет из 3 – 7 пиков на частотах, разнесенных на несколько Гц, – позволяет предположить наличие нескольких мод с близкими частотами (Рис. 3).

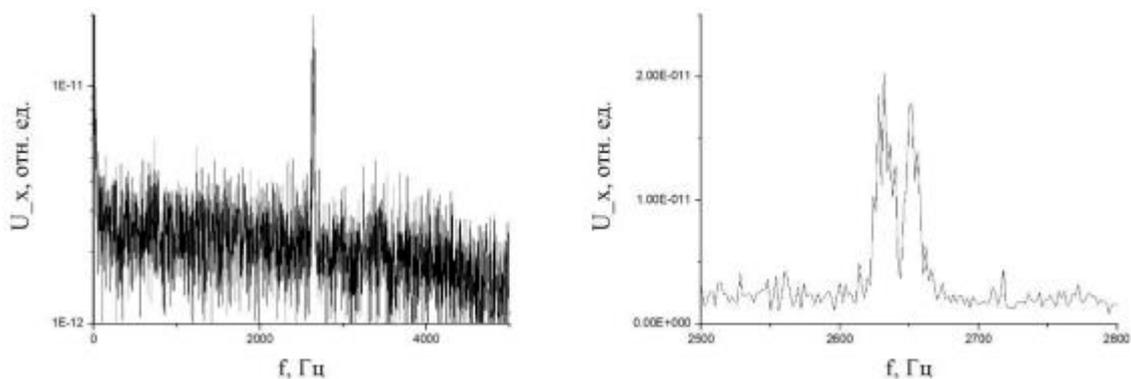


Рисунок 3 – Спектр горизонтальной компоненты дрожания. Высота над срезом сопла 30 см, $NPR = 6$. Общий вид (слева) и спектральный состав в окрестности частоты основного дискретного тона 2650 Гц.

Значения пиковых частот основного тона в акустических и оптических спектрах практически совпадают, различие меньше полуширины пакета в спектре угловых отклонений. Их зависимость от NPR , в целом, соответствует известным теоретическим формулам [2], но обнаружено отклонение вверх в окрестности $NPR = 4$, свидетельствующее о переходе на генерацию другой моды.

Анализ спектров на начальном участке СС показал наличие пульсаций двух типов со степенными спектрами. Спектр пульсаций первого типа имеет показатель, близкий к модели развитой турбулентности $-5/3$ и характерные частоты в диапазоне 60 – 300 кГц. На более высоких частотах значение показателя приближается к $-14/3$, что (с учетом его уменьшения вследствие осредняющего действия диафрагмы на 1) соответствует модели когерентной турбулентности с разрушением крупномасштабных вихрей, которые возникают во внешнем слое смешения. Эта компонента присутствует во всех спектрах, как при просвечивании через ось СС, так и при смещении луча в область внешнего слоя смешения. Нормировка на абсциссу и ординату максимума спектра приводит к хорошему совпадению спектров в этой области

частот. По-видимому, пульсации этого типа локализованы во внешнем слое смещения, характерный поперечный размер которого можно оценить как половину высоты первой бочки (1 – 2 см), что и дает нижнюю частоту $\sim 30 - 60$ кГц. На высоких частотах (1 МГц и больше) при зондировании приосевой области в спектрах обнаруживается еще один степенной участок со значительно меньшим по модулю значением показателя (от -3 при малых NPR до $-11/3$ при увеличении NPR до 7). На высотах, соответствующих области смыкания внутреннего и внешнего слоев смещения показатели у обеих компонент спектра растут по модулю и сближаются. В итоге к высоте 215 мм вторая (высокочастотная) компонента спектра уже не различается даже при зондировании через ось СС.

Заключение

Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что возбуждение скрич-тонов происходит в нерегулярных промежутках. Характерная длительность интервала генерации составляет несколько десятых долей секунды (около 1000 периодов). Внутри интервала генерации колебания имеют форму, близкую к гармонической, и группируются в пакеты из 10 – 20 периодов, после которых наблюдаются замирания. Анализ взаимной корреляции углов отклонения пучков, прошедших по разные стороны от оси струи, позволяет выделить 4 варианта колебательных процессов на частоте скрича, лишь один из которых соответствует классическому [3] механизму возбуждения. Наблюдающиеся примерно в четверти случаев другие режимы колебаний достоверно ассоциировать с каким-либо известным механизмом не удалось.

Турбулентность в прикорневом участке СС соответствует степенной модели с внешним масштабом порядка поперечного размера внутреннего слоя смещения (несколько мм) и показателем, по модулю меньшим чем у турбулентности во внешнем слое смещения. По мере турбулизации потока обогащается низкочастотная область и увеличивается по модулю показатель спектра. После смыкания слоев смещения, т.е. выравнивания их характерных поперечных размеров, турбулентность внешнего слоя становится неотличима от турбулентности внутри канала струи.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Дейч М.Е. Теоретическая гидродинамика. Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 669 с.
2. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике / Гапонов С.А., Маслов А.А. (ред.) – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 200 с.
3. Powell A. On the mechanism of choked jet noise. Proc. Physical Society B. 1953. V. 66. P. 1039–1056.