

УДК 532.522.2;534.83

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКИХ И ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2011 г.

С.Ю. Крашенинников, А.К. Миронов

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

krashenin@ciam.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

На основании измерений акустического излучения свободной турбулентной струи микрофонной системой, с помощью которой определялось положение источников звука для заданной частоты, и термоанемометрических измерений скорости движения динамических неоднородностей заданного размера в слое смешения предложена модель порождения гидродинамического шума. Показано, что возникновение акустических волн может быть объяснено исходя из наличия в струе перемежаемости турбулентности, нестационарного движения области, занятой «турбулентной жидкостью». Вследствие этого возникает нестационарное движение воздуха, эжектируемого струей, создающее акустические волны.

Ключевые слова: турбулентная струя, шум турбулентной струи, скорость конвекции вихрей, источники звука, перемежаемость турбулентности, турбулентная жидкость.

Турбулентная струя, например реактивная струя авиационного двигателя, является мощным источником широкополосного шума. Согласно общим представлениям, акустическое излучение дозвуковой струи создается турбулентными пульсациями скорости. Накоплен большой экспериментальный материал по определению расположения источников звука в слое смешения. Но эти эксперименты нуждаются в дополнении соответствующими исследованиями структуры турбулентного течения, создающего шум. В экспериментах осуществлялась идентификация источников шума как по месту их расположения (локализация), так и по скорости движения. Исследовалось течение в затопленных и в соосных турбулентных струях, проводились измерения средней скорости, пульсационных, спектральных и корреляционных характеристик. Исследовались струи воздуха и гелия, распространявшиеся из модельных сужающихся сопел. Использовались результаты акустических измерений вне струи, главным образом, струи авиационного двигателя с диаметром сопла 1450 мм при скоростях истечения 240–300 м/с [1]. Для определения скорости конвекции использовалась пространственно-временная корреляция пульсаций продольной скорости: $u_c = \Delta x / \Delta \tau$, Δx – расстояние между датчиками, $\Delta \tau$ – временной интервал между максимумами корреляции сигналов. На рис. 1 изображена схема измерений скорости конвек-

ции: 1 – сопло, 2 – струя, 3 – термоанемометрические датчики.

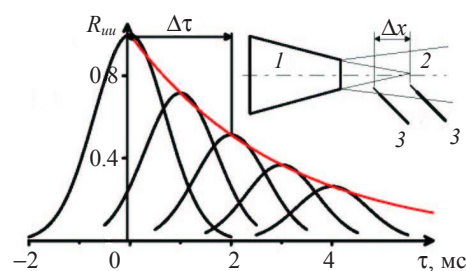


Рис. 1

На рис. 2 на примере струи из сопла авиационного двигателя представлена схема акустических измерений, с помощью которых определялось расположение источников звука для заданной частоты f : 1–6 – микрофоны, 7 – авиадвигатель, 8 – струя, 9 – микрофонные усилители.

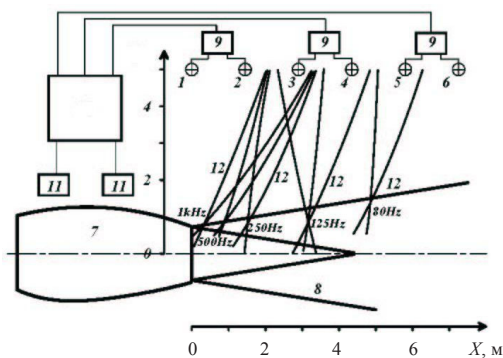


Рис. 2

10 – магнитный регистратор, 11 – датчики оборотов, 12 – линии равных фаз для заданной частоты. На этом же рисунке показано, как по результатам корреляционных измерений акустических сигналов двух микрофонов определялись линии, на которых могут быть расположены источники звука.

Слой смешения формируется в результате перемежаемости – нестационарного перемещения «полностью турбулентной жидкости». На рис. 3а показана эволюция слоя смешения, на рис. 3б – схема переноса вихрей. Такая схема согласуется с известными представлениями о структуре слоя смешения [2]. Заштрихованной областью обозначена «полностью турбулентная жидкость» (в дальнейшем называемая турбулентной жидкостью), в которой коэффициент перемежаемости $\gamma = 1$. Величина γ определяется как относительное время пребывания турбулентной жидкости в данной точке. Слой смешения представляет собой расширяющуюся по линейному закону область с характерной шириной b . Внутри этой области перемещается турбулентная жидкость, сосредоточенная в зоне толщиной δ_T , и значение величины γ меняется от 0 до 1.

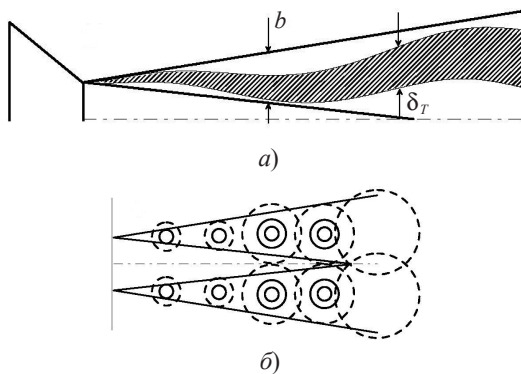


Рис. 3

Измерения в полосах частот проводились с целью установления отличия в свойствах динамических неоднородностей разных размеров. При этом предполагалось, что фильтры со средней частотой f выделяют при неподвижных датчиках термоанемометров сигнал от динамической неоднородности с характерным продольным размером $l = u_f / f$, где u_f – скорость конвекции на данной частоте f . Сопоставление данных акустических измерений с данными измерений скорости движения вихрей указывает на определенные особенности порождения акустических возмущений турбулентными пульсациями в струе. Согласно корреляционным измерениям, крупные вихри движутся с ускорением до тех пор, пока их поперечный размер не становится практи-

чески равным толщине слоя турбулентной жидкости. Это соответствует характерному продольному масштабу $l \approx 1.4b$. С другой стороны, локализация источников шума (см. рис. 2) показывает, что характерная частота излучения элементарного сечения струи соответствует $f = u_f / 1.4b$. Это указывает на то, что излучение звука возникает вследствие нестационарного движения самой турбулентной жидкости, то есть рассмотренные движущиеся неоднородности являются элементами области полностью турбулентной жидкости, и излучение звука обусловлено пульсационным движением этой области. Возникновение акустических пульсаций при колебаниях слоя турбулентной жидкости связано с воздействием этого слоя на внешнюю среду. Известно, что в тонком слое с высокой интенсивностью пульсаций поперечной скорости статическое давление понижено [2]. Перемещения этой области создают вне ее нестационарные изменения газодинамических параметров – пульсации в эжекционном движении окружающей среды. Это приводит к образованию акустических возмущений.

Заключение

Исследования показали, что излучение шума струей возникает при нестационарном движении зоны полностью турбулентной жидкости. Движение этой зоны, которая одновременно является областью пониженного давления, вызывающего подтекание к струе, создает пульсации расхода в индуцированном струей течении окружающего воздуха, т.е. имеется аналогия с известными источниками звука: свисток, механическая сирена, громкоговоритель и другими, для которых установлено, что именно колебания расхода в основном движении среды создают звуковые волны.

Представленная модель шумообразования в турбулентной струе позволяет объяснить данные экспериментов по определению расположения источников звука для разных частот, приведенные в большом количестве работ. Результаты локализации показывают три области расположения источников, соответствующих разным способам определения их местонахождения. Группа микрофонных измерений вблизи границ струи соответствует более низким измеряемым частотам излучения. Это связано с тем, что псевдозвуковые пульсации давления затухают экспоненциально, но тем «медленнее», чем больше размер источника. В связи с этим микрофоны, не имея направленности в восприятии излучения, фиксируют преимущественно излучение из областей, расположенных

ниже по потоку, в результате чего возникает ошибка. Основная группа измерений на удалении от границ струи, по-видимому, правильно определяет положение источников звука для разных частот. Третья группа измерений, проводившихся в дальнем акустическом поле струи, не позволяет правильно определить положение источников. Это связано с тем, что первоначально создаваемые перемежающимся движением зоны «турбулентной жидкости» пульсации в эжектируемой струей среде создают акустическое излучение, диаграмма направленности которого формируется в результате нелинейного взаимодействия разночастотных акустических волн, и направление их распространения формируется в результате этого взаимодействия.

Такое представление о формировании акустического поля струи согласуется с известным

чрезвычайно низким уровнем корреляции акустических возмущений и турбулентных пульсаций в струе.

Таким образом, можно заключить, что акустическое поле излучения формируется вне струи, хотя его интенсивность и спектр определяются свойствами пульсационного движения среды в слое смешения. Это соответствует обычным представлениям о «ближнем» и «дальнем» поле излучения шума турбулентной струи.

Список литературы

1. Довжик С.В. и др. Локализация источников шума в выхлопной струе ТРДД // Тр. ЦИАМ. 1991. №1287. С. 61–75.

2. Таунсенд А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. 399 с.

LOCALIZATION THE SOUND SOURCES IN A TURBULENT JET USING THE RESULTS OF THE ACOUSTIC AND HOT-WIRE MEASUREMENTS

S. Yu. Krasheninnikov, A.K. Mironov

A model of jet noise generation is proposed on the basis of the measurements of the acoustic radiation of a free jet by means of a microphone system, which makes it possible to determine the location of sources of sound at a given frequency, and hot-wire measurements of the velocity of the motion of vortices of given dimensions in the mixing layer. It is shown that the acoustic wave generation can be attributed to turbulence intermittence in the jet, unsteady motion of a region occupied by a «turbulent fluid». As a result, an unsteady motion of the air ejected by the jet is appeared and it produces acoustic waves.

Keywords: turbulent jets, turbulent jet noise, convective velocity of vortices, sound sources, turbulence intermittence, turbulent fluid.