

УДК 532.517.4

ПУЛЬСАЦИИ ПЛОТНОСТИ И ДАВЛЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ГАЗА И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

© 2011 г.

Ф.В. Шугаев, Е.Н. Терентьев, Л.С. Штеменко, О.И. Доукина

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

shugaev@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Исследовалось взаимодействие ударной волны с турбулентным потоком в ударной трубе. Турбулизация осуществлялась с помощью сетки. Отраженная от перфорированного торца волна взаимодействовала с потоком. Числа Маха падающей волны равны 1.9–4.0, отраженной волны – 1.6–2.5. Получены корреляционные функции пульсаций давления и плотности. Определен масштаб турбулентности за падающей волной. За отраженной волной он на порядок меньше. Установлено, что давление за отраженной волной в турбулентном потоке на 10% выше соответствующего значения в ламинарном потоке при прочих равных условиях.

Ключевые слова: турбулентные пульсации плотности и давления, турбулентный масштаб, ударная волна.

Экспериментальная установка

Изучалось распространение ударной волны в турбулентном потоке воздуха. Эксперименты выполнены в ударной трубе прямоугольного сечения 40×60 мм. Турбулизация потока осуществлялась с помощью сетки, диаметр отверстий был равен 3 мм. Сетка располагалась на расстоянии 700 мм от рабочей секции, благодаря чему падающая ударная волна могла восстановить свою первоначальную форму. В конце рабочей секции ударная волна отражалась от перфорированной стенки и взаимодействовала с турбулентным потоком. Числа Маха падающей волны были равны 1.9–4.0, отраженной волны – 1.6–2.5. За сеткой образовывались вихревые кольца. Пульсации давления измерялись пьезодатчиком диаметром 2.5 мм, расположенным заподлицо со стенкой трубы, пульсации плотности – с помощью лазерной шпирен-методики. Зондирующий луч лазера диаметром в 1 мм пересекал рабочую секцию и падал на секционированный фотодиод, сигнал с которого поступал на цифровой осциллограф. Турбулентные пульсации давления составляли 2% от соответствующей средней величины за падающей волной. Для восстановления плотности использована математическая процедура, описанная в [1]. При этом турбулентность считалась изотропной и использовалась гипотеза Тейлора. Измерялась также средняя скорость падающей и отраженной волн на разных базах (10–65 мм) и различных расстояниях от торца рабочей секции.

Результаты и их обсуждение

При взаимодействии отраженной ударной волны с пограничным слоем на стенках трубы образуется λ -конфигурация. В ядре потока волна сначала приобретает вогнутую форму, затем становится V-образной. Через некоторое время возникает маховское взаимодействие косых волн, потом процесс повторяется. Скорость отраженной волны сначала растет, затем падает.

Пульсации давления и плотности обрабатывались статистическими методами. Найдены корреляционные функции пульсаций, их фазовые портреты, плотности вероятности распределения характерных величин в зависимости от радиуса $r = (p^2 + (p')^2)^{1/2}$ фазовой траектории (штрих означает дифференцирование по времени). Радиус r связан с интенсивностью вихревых колец. По корреляционным функциям определен масштаб l турбулентности. На рис. 1, 2 представлена зависимость безразмерного масштаба $L = l/d$ турбулентных пульсаций от числа Маха M падающей ударной волны. Здесь d – диаметр отверстий в сетке. На величину масштаба влияют условия образования вихревых колец. После взаимодействия с отраженной ударной волной турбулентный масштаб уменьшается на порядок.

Анализ фазовых портретов пульсаций плотности и давлений показывает, что радиус r за отраженной волной уменьшается в течение всего времени регистрации процесса.

Это свидетельствует об уменьшении интен-

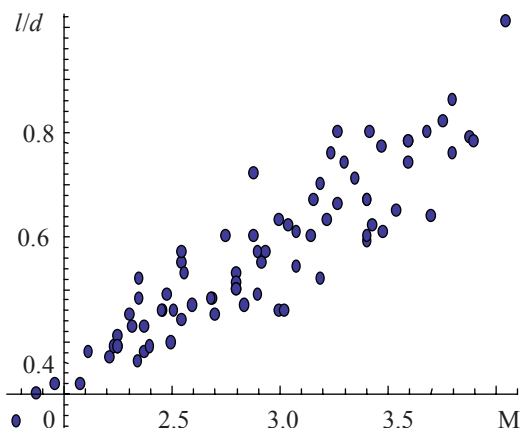


Рис. 1

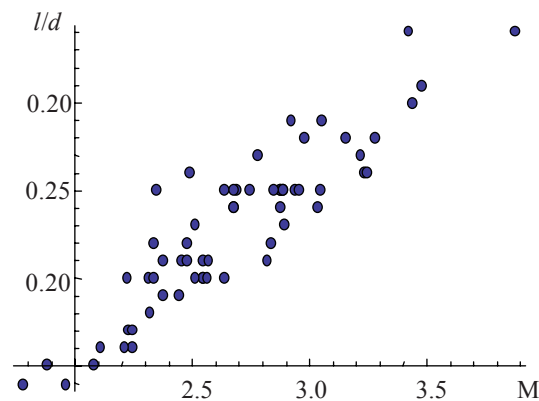


Рис. 2

сивности вихревых колец, что возможно при их распаде.

Возможная причина этого явления такова. В турбулентном потоке всегда существуют акустические волны, возникающие при взаимодействии вихревых структур. После взаимодействия с отраженной волной акустические волны усиливаются, происходит их резонансное рассеяние на вихревых кольцах. При этом последние становятся неустойчивыми и распадаются на более мелкие кольца. Это и приводит к уменьшению масштаба турбулентности за отраженной волной.

Измеренные значения давления за отраженной ударной волной в турбулентном потоке воздуха превышают на 10% соответствующие значения в отсутствие турбулентности при прочих равных условиях. Этот факт может быть вызван нагревом газа за счет акустических возмущений

и вихревых структур.

Заключение

Найдено, что масштаб сеточной турбулентности возрастает с увеличением числа Маха проходящей ударной волны. Установлено, что при взаимодействии ударной волны с турбулентностью масштаб турбулентности уменьшается на порядок и далее продолжает убывать. Обнаружено, что давление за отраженной ударной волной в турбулентном потоке на 10% превышает соответствующую величину в отсутствие турбулентности. Обсуждены механизмы этих эффектов.

Список литературы

1. Bystrov S.A. et al. // Shock Waves. 1998. V. 8. P. 183–189.

FLUCTUATIONS OF DENSITY AND PRESSURE IN A TURBULENT FLOW AND THEIR INTERACTION WITH A SHOCK WAVE

F.V. Shugaev, E.N. Terentiev, L.S. Shtemenko, O.I. Dokukina

Interaction of a shock wave with a turbulent air flow is investigated. A grid-generated turbulence was used. The shock wave propagates in a shock tube, reflects from a perforated disc and then interacts with the turbulent flow. The Mach numbers were equal to 1.9–4.0 for the incident shocks and to 1.6–2.5 for the reflected ones. The correlation functions for pressure fluctuations and for density fluctuations were determined. The turbulent length scale behind the incident shock was found. The length scale decreases behind the reflected shock and is of an order as small as its value ahead of the shock. The pressure behind the reflected shock is found to be 10% as large as the appropriate value in the laminar flow under the same conditions.

Keywords: turbulent fluctuations of pressure and density, turbulent length scale, shock wave.