

## АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 533.6.011.72

## ПУЛЬСАЦИИ ПЛОТНОСТИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПЕРЕД И ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

О. А. Азарова, Е. А. Братинкова, Л. С. Штеменко, Ф. В. Шугаев, В. Е. Яницкий

(кафедра квантовой статистики и теории поля)

Экспериментально и теоретически исследованы пульсации плотности перед и за ударной волной в турбулентном газе. Измерен и рассчитан коэффициент усиления пульсаций, найдено изменение их коэффициента корреляции при переходе через фронт ударной волны, определен масштаб турбулентности при различных числах Маха ударной волны. Эксперименты выполнены в ударной трубе, поток турбулизовался с помощью сетки. Турбулентность моделировалась последовательностью импульсов скорости. Экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются друг с другом.

Турбулентные течения газа часто встречаются в природе и технических устройствах. Однако до сих пор отсутствует их адекватное описание. Изучение распространения ударной волны в турбулентной среде, которое сопровождается нелинейным взаимодействием волны с пульсациями параметров среды, может способствовать пониманию природы и свойств турбулентности. При таком взаимодействии изменяются не только пульсации среды, но и характеристики самой ударной волны, что позволяет рассматривать ударную волну как некий зонд. Кроме того, данная задача связана с проблемой устойчивости ударной волны, а также с проблемами экологии. Цель настоящей работы — определение статистических характеристик (коэффициента корреляции пульсаций плотности, масштаба турбулентности) турбулентного потока до и после прохождения плоской ударной волны. Характеристики определены как экспериментально (квазистационарный поток в ударной трубе), так и с помощью численного моделирования. Имеющиеся в литературе экспериментальные результаты крайне скудны [1, 2].

В расчетах использовалась численная схема второго порядка точности с выделением фронта ударной волны для одномерных нестационарных уравнений Эйлера:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho u(E + p/\rho) \end{pmatrix},$$

где  $\rho, p, u$  — плотность, давление, скорость соответственно;  $E = e + u^2/2$ ,  $e = p/[(\gamma - 1)\rho]$  — удельная внутренняя энергия,  $\gamma$  — показатель адиабаты ( $\gamma = 1,4$ ). Шаг по пространству был равен 0,01. Метод позволял вести расчеты в областях, непосредственно прилегающих к фронту волны. Система координат связана с газом перед волной. Турбулентность моделировалась возмущениями скорости перед фронтом волны. Использовались две модели: два прямоугольных импульса равной амплитуды и противоположного знака и пакет импульсов, амплитуды кото-

рых определялись последовательностью случайных величин, распределенных по нормальному закону с дисперсией  $\sigma = M_t c_0$ , где  $c_0$  — скорость звука в невозмущенном газе,  $M_t$  — числовой параметр.

Эксперименты выполнены в однодиафрагменной ударной трубе [3]. Рабочим газом служил воздух. Турбулентность создавалась с помощью сетки, помещенной в камере низкого давления на расстоянии 1,5 м от рабочей секции. Расстояние от границы турбулизованного сеткой потока газа до фронта падающей ударной волны зависело от времени наблюдения и числа Маха волны. В потоке газа непосредственно за фронтом волны также наблюдались пульсации плотности. Они возникали из-за небольших неровностей стенок ударной трубы. Таким образом, экспериментально изучались пульсации плотности, механизм возникновения которых был различен.

Для регистрации пульсаций плотности была использована лазерная шпирен-методика [4]. Отклонение луча измеряли с помощью секционированного фотодиода (в линейной области его чувствительности). Предполагалось, что течение за ударной волной статистически однородно вдоль луча. В рабочей секции ударной трубы была помещена пластина (высотой  $h = 6$  мм), течение около которой было близко к двумерному. Исследовалось течение за падающей плоской ударной волной и за цилиндрической головной волной вблизи пластины на оси трубы при квазистационарном обтекании этой пластины. Числа Маха падающей волны  $M_{in}$  лежали в пределах  $1,5 \div 3$ , числа Маха головной волны  $M$  — в пределах  $1,9 \div 2,1$ .

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости коэффициента корреляции пульсаций плотности  $N_{12}(R)/N_{12}(0)$  перед и за фронтом ударной волны. Расчетные значения этого коэффициента имеют аналогичную форму.

На рис. 2, а, б показаны экспериментальные значения масштаба турбулентности  $L$  соответственно за падающей и головной волнами перед пластиной в зависимости от числа Маха падающей волны  $M_{in}$ . Прямые построены методом наименьших квадратов

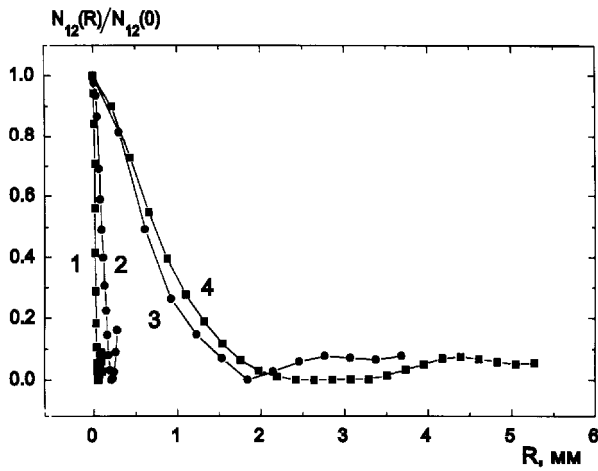


Рис. 1

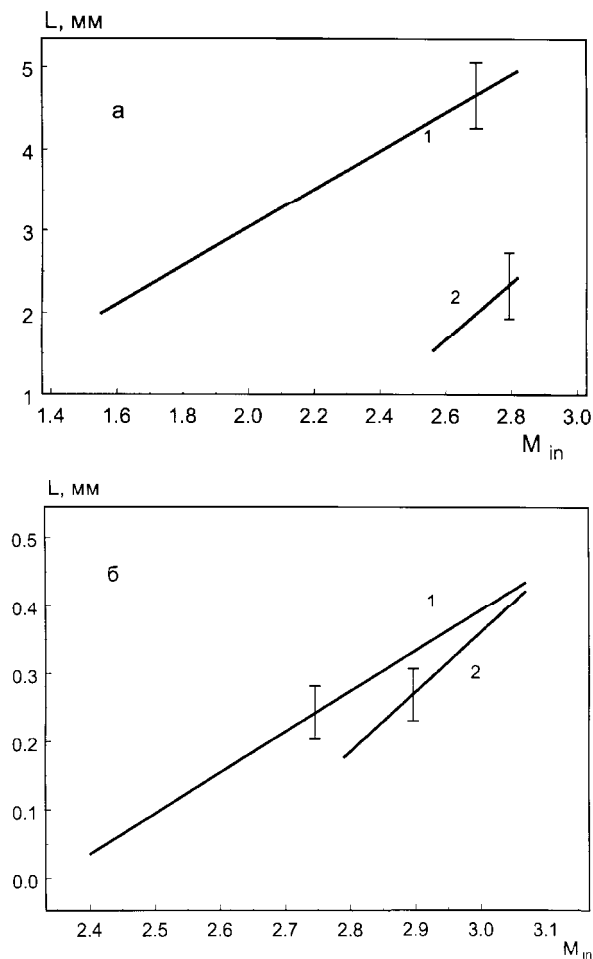


Рис. 2

по экспериментальным точкам. Вертикальные отрезки дают доверительный интервал.

Линии 1 соответствуют пульсациям, возникающим в ударной трубе из-за неровностей стенок, линии 2 — пульсациям, сформированным сеткой. Видно, что масштаб турбулентности существенно уменьшается при переходе через фронт ударной волны. При числе Маха падающей волны  $M_{in} = 2,8$  масштаб турбулентности в потоке, прошедшем через сетку, уменьшается в 13 раз, а в потоке непосредствен-

но за фронтом волны — в 19 раз. Размер неоднородностей перед волной во втором случае больше, чем в первом, примерно в два раза, т.е. чем больше размер неоднородностей в потоке, тем сильнее она сжимается в ударной волне, что согласуется с общими представлениями о взаимодействии неоднородностей с ударной волной. Кроме того, отмечается рост масштаба турбулентности с увеличением числа Маха падающей ударной волны. На рис. 3 приведены значения коэффициента усиления пульсаций  $k$  в зависимости от числа Маха головной волны, рассчитанные по численной схеме (треугольники) и по линейной теории взаимодействия ударной волны с акустическими возмущениями (сплошная кривая), пунктир соответствует значениям  $k = \sqrt{\rho_2/\rho_1}$  ( $\rho_2$  — плотность за волной,  $\rho_1$  — перед волной), кружок и квадрат — экспериментальные значения в потоке, прошедшем через сетку, и за фронтом волны соответственно.

Как видно из рис. 3, расчетные значения коэффициента усиления пульсаций плотности хорошо согласуются с зависимостью  $k = \sqrt{\rho_2/\rho_1}$ . Экспериментальные значения коэффициента усиления больше расчетных. Это может быть связано с тем, что средняя амплитуда пульсаций плотности в экспериментах составляла 0,036 от средней плотности потока, а в расчетах была принята равной 0,1.

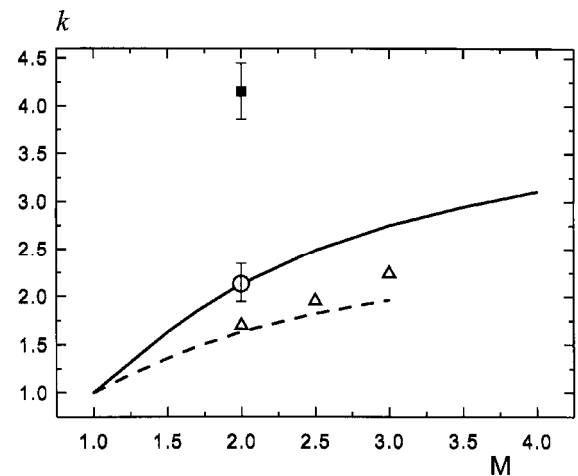


Рис. 3

Итак, масштаб турбулентности при переходе через ударную волну уменьшается в десятки раз при числе Маха этой волны, равном  $1,9 \div 2,1$ . Результат не зависит от способа возникновения неоднородностей в потоке газа.

Экспериментальные данные и модельные расчеты соответствуют друг другу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 97-01-00298).

#### Литература

1. Wintrich H., Merzkirch W. // Proc. 19th Int. Symp. Shock Waves (1993). Springer Verlag, 1995. V. 5. P. 319.

2. Briassulis G., Andreopoulos J. // 20th Int. Symp. Shock Waves (1995). Abstracts. Pasadena, CA. Grad. Aeronaut. Lab. Calif. Inst. of Technol., 1995. P. 527.
3. Братинкова Е.А., Штеменко А.С., Шугаев Ф.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. №3. С. 63 (Moscow

University Phys. Bull. 1998. No. 3).

4. Kiefer J.H., Hajduk J.C. // Proc. 12th Int. Symp. Shock Waves and Tubes. Jerusalem, 1980. P. 97.

Поступила в редакцию  
13.01.99