

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Пульсации давления в турбулентном потоке газа  
и их взаимодействие с ударной волной**О. И. Докукина<sup>1</sup>, Е. Н. Терентьев<sup>2</sup>, Л. С. Штеменко<sup>1</sup>, Ф. В. Шугаев<sup>1,а</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
<sup>1</sup>кафедра квантовой статистики и теории поля; <sup>2</sup>кафедра компьютерных методов физики.  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: <sup>а</sup>shugaeв@phys.msu.ru*

Статья поступила 07.09.2012, подписана в печать 04.11.2012.

Исследовано взаимодействие ударной волны с турбулентным потоком воздуха в ударной трубе. Турбулизация потока осуществлялась с помощью сетки. Отраженная от перфорированного торца волна взаимодействовала с потоком. Числа Маха падающей волны — 1.9–4, отраженной волны — 1.6–2.5. Получены корреляционные функции пульсаций давления и их фазовые портреты. Определен масштаб турбулентности за падающей волной, за отраженной волной он на порядок меньше. Установлено, что давление за отраженной волной в турбулентном потоке на 7–8% выше соответствующего значения в ламинарном потоке при прочих равных условиях.

*Ключевые слова:* ударные волны, турбулентное течение, вихревые кольца, акустические возмущения, масштаб турбулентности.

УДК: 519.6:531.33. PACS: 47.27.Ch.

**Введение**

Взаимодействие ударной волны с турбулентностью — это существенно нелинейный процесс, в котором оба явления влияют друг на друга. Ударная волна усиливает турбулентные пульсации. В свою очередь турбулентность приводит к уширению зоны ударного перехода. Исследование данного явления представляет интерес с точки зрения фундаментальной науки (распространение нелинейных волн в случайно неоднородной среде) и одновременно имеет большую практическую важность для задач внешней и внутренней аэродинамики. Как известно, ударные волны возникают внутри турбин и компрессоров. Явление интересно и с точки зрения экологии (распространение N-волны в турбулентной атмосфере). Особое место занимает задача о распространении ударной волны по турбулентности, которую приближенно можно считать однородной и изотропной. Масштаб турбулентности, так же как и интенсивность турбулентных пульсаций, является одним из основных параметров, определяющих свойства потока, особенно его способность к перемешиванию.

Первые исследования турбулентных пульсаций скорости в сверхзвуковых потоках были выполнены в работе [1]. Позже появились исследования, в которых изучались турбулентные пульсации в пограничном слое [2], плоском сверхзвуковом следе [3], аэродинамической трубе [4], при взаимодействии со скачком уплотнения [5]. Было показано, что с ростом числа Маха уменьшается уровень пульсаций скорости и возрастают пульсации плотности и давления. Масштаб турбулентности не определялся. В работах [6–8] исследована структура турбулентных пульсаций скорости, порождаемых сетками или хонейкомбами, установленными в аэродинамической трубе при малых средних скоростях потока (от 5 до 15 м/с). Найдено, что масштаб турбулентности растет с расстоянием от сетки или

хонейкомба по степенному закону. Для сеток показатель степени равен 0.5. Согласно работе [9], показатель степени лежит в пределах от 0.3 до 0.53. В работе [10] изучалось изотропное турбулентное течение в ударной трубе. Турбулизация потока осуществлялась с помощью сеток. Интервал чисел Маха потока составлял 0.3–0.6. Измерялись пульсации скорости в осевом и поперечном направлениях, завихренность, скорость ее изменения, компоненты тензора скоростей деформаций. Был определен интегральный масштаб турбулентности для пульсаций осевой скорости потока. С увеличением расстояния от сетки масштаб турбулентности растет приблизительно по линейному закону. Пульсации плотности воздуха в дозвуковом потоке в ударной трубе измерялись в работах [11–12] методом спеклов. Представлены корреляционные функции за падающей и отраженной ударными волнами. Число Маха падающих волн равно 1.1 и 1.35. В работе [13] проведено численное моделирование взаимодействия турбулентных пульсаций параметров течения сжимаемого газа с ударной волной. В работе [14] измерялось давление за ударной волной, прошедшей через турбулентный поток в перпендикулярном направлении к его скорости. Ударная волна имела сферическую форму, а течение за ней было нестационарным. Поток воздуха со скоростью 10 и 17.5 м/с создавался в аэродинамической трубе, ударная волна формировалась в ударной трубе. Число Маха волны равнялось 1.15. Найдено, что давление за отраженной ударной волной в турбулентном потоке воздуха увеличивается с ростом среднеквадратичной амплитуды пульсаций скорости в нем.

Таким образом, в проведенных исследованиях числа Маха ударной волны были близки к единице. В большей части работ изучались турбулентные пульсации скорости потока. Цель настоящей работы — экспериментальное исследование взаимодействия ударной вол-

ны в широком диапазоне чисел Маха ( $M = 1.9-4$ ) с почти однородной и изотропной турбулентностью. Исследование включает в себя определение масштаба турбулентных пульсаций давления до и после взаимодействия с ударной волной. Масштаб турбулентности, одна из главных характеристик турбулентного течения наряду с энергией турбулентных пульсаций, определяет процессы переноса энергии и перемешивания в турбулентной среде.

### Экспериментальная установка и результаты

Нами изучалось распространение ударной волны в турбулентном потоке воздуха. Эксперименты выполнены в ударной трубе прямоугольного сечения  $40 \times 60$  мм (рис. 1).

Турбулизация течения за падающей ударной волной производилось с помощью сетки, которая представляла собой пластину со 150 отверстиями диаметром 3 мм. Как известно, турбулентность, созданная сеткой, в максимальной степени близка к однородной изотропной турбулентности. Это определило выбор экспериментальной установки. В потоке за сеткой образовывались вихревые кольца. Сетка располагалась на расстоянии 700 мм от рабочей секции, что позволяло прошедшей через нее ударной волне восстановить свою форму. Волна отражалась от перфорированного торца в конце рабочей секции и взаимодействовала с турбулентным потоком. Число Маха падающей волны равнялось 1.9–4, число Маха отраженной волны 1.6–2.5. Давление и его пульсации измерялись пьезодатчиком диаметром 2.5 мм, смонтированным заподлицо с верхней стенкой рабочей секции на расстоянии 3 калибров от ее торца. Амплитуда пульсаций составляла 1–1.5% от соответствующей средней величины давления за падающей ударной волной, что соответствует 0.23–0.45 кПа. Чувствительность датчика равна 4.439 мВ/кПа. Число Рейнольдса было приблизительно равно  $1.3 \cdot 10^5$ .

Измерялась средняя скорость падающей и отраженной ударных волн на разных базах (от 10 до 65 мм) и на различных расстояниях от торца рабочей секции. Для этой цели использовался гелий-неоновый лазер, луч которого пересекал рабочую секцию и падал на секционированный фотодиод. Сигналы с фотодиода и пьезодатчика поступали на осциллограф. Время прихода турбулентной области течения к датчику давления определялось по осциллограмме сигналов с фотодиода, которые связаны с пульсациями плотности в турбулентном течении.

Известно, что при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем на стенках трубы образуется  $\lambda$ -конфигурация [15, 16]. В этих работах теневые картины течения даны на расстоянии  $L = 0.5$  калибра от торца. В работе [17] такие картины приведены на расстоянии от  $L = 0$  до  $L = 2.5$  калибра. На них видно, что в ядре потока волна сначала приобретает вогнутую форму, затем становится V-образной. Через некоторое время возникает маховское взаимодействие косых волн и появляется опять  $\lambda$ -конфигурация. При этом скорость отраженной волны меняется вдоль канала — то возрастает, то уменьшается.

В турбулентном течении наблюдались пульсации давления и акустические возмущения, частота которых значительно меньше частоты пульсаций давления. Эти низкие частоты отфильтровывались. Высоочастотные сигналы обрабатывались статистическими методами. Были получены корреляционные функции пульсаций давления и их фазовые портреты.

На рис. 2 показана осциллограмма сигналов пьезодатчика от падающей и отраженной волн, акустических возмущений и пульсаций давления. По оси ординат даны значения напряжения в вольтах, возникающего на пьезодатчике, по оси абсцисс — время в микросекундах.

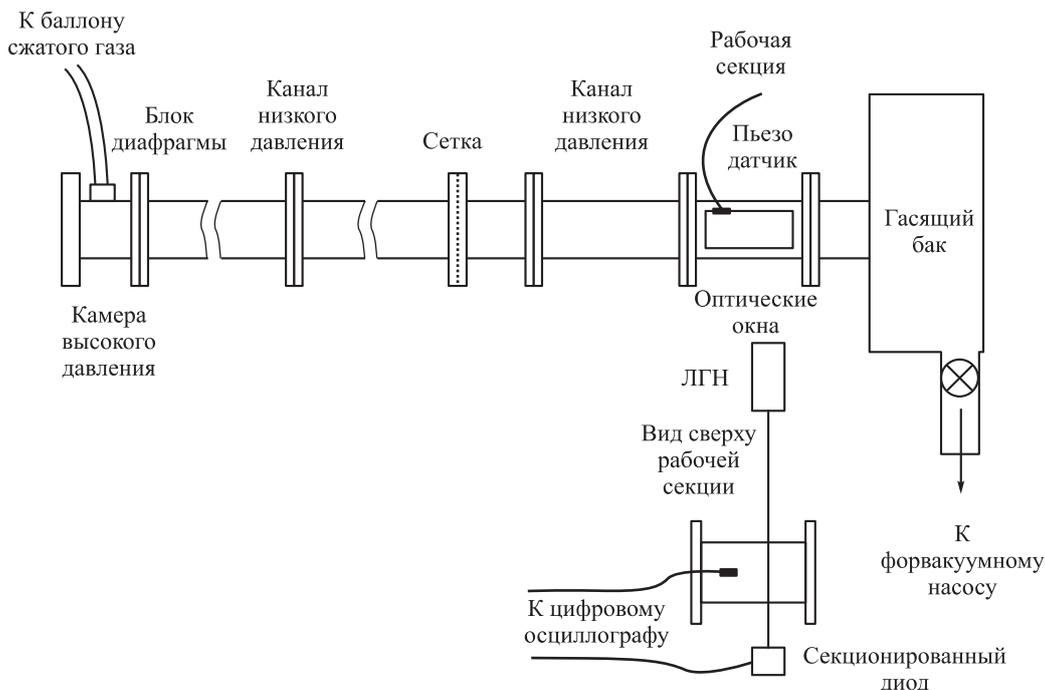


Рис. 1. Схема установки

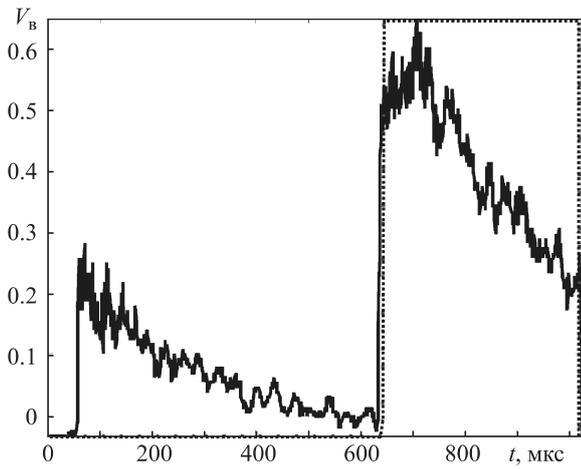


Рис. 2. Оциллограмма давления

На рис. 3 представлена временная корреляционная функция пульсаций давления за падающей ударной волной. По оси абсцисс отложено время в микросекундах. Кружки соответствуют целочисленным значениям времени (в мкс). Кривая проведена в соответствии с теоремой отсчетов. Так как скорость  $v$  течения за падающей волной постоянна, то переход к пространственной корреляционной функции осуществляется по формуле  $r = vt$ , где  $t$  — время корреляции,  $r$  — расстояние в мм. По пространственным корреляционным функциям определен масштаб турбулентности  $l$ . На рис. 4 показана зависимость масштаба турбулентных пульсаций давления за падающей волной от числа Маха  $M$ . По оси абсцисс отложено число Маха, по оси ординат —  $l/d$ , где  $d$  — диаметр отверстий в сетке,  $l$  — масштаб турбулентности. Из графика видно, что относительный масштаб турбулентных пульсаций давления меняется от 0.13 до 0.4 с увеличением числа Маха от 2 до 4. Зависимость масштаба турбулентности от числа  $M$  объясняется условиями образования вихревых колец у сетки: в наших опытах интенсивность ударной волны возрастает при уменьшении начального давления в канале. Последнее приводит к удлинению струй, текущих через отверстия в сетке, и увеличению размера вихревого кольца на их конце.

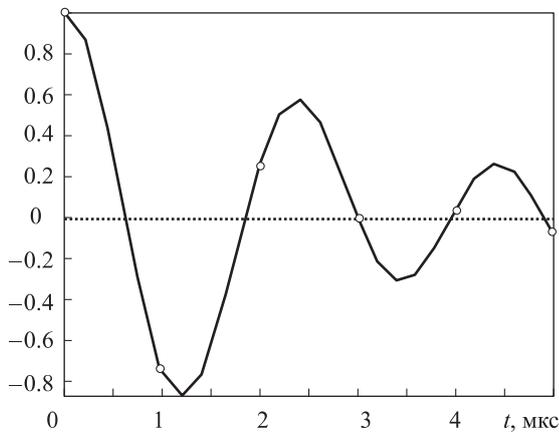


Рис. 3. Временная корреляционная функция. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — корреляционная функция

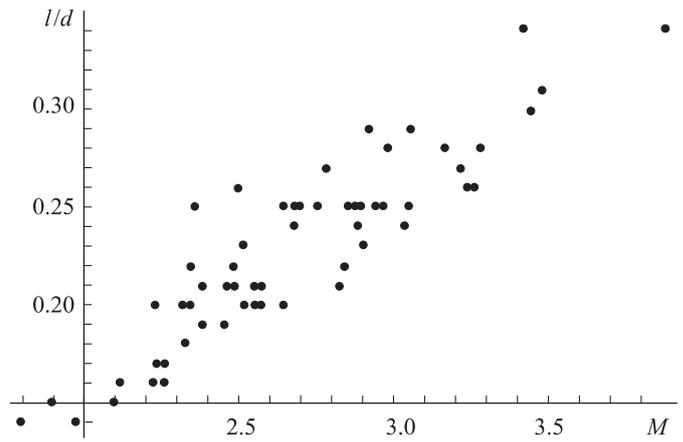


Рис. 4. Масштаб турбулентности  $l$  в зависимости от числа Маха  $M$  падающей волны;  $d$  — диаметр отверстий в сетке

Временная корреляционная функция за отраженной волной имеет тот же вид, что и соответствующая функция за падающей волной: временной масштаб турбулентности практически тот же. Поскольку скорость течения газа за отраженной волной на порядок меньше скорости течения газа за падающей, то и масштаб турбулентности за отраженной волной должен быть на порядок меньше, чем за падающей волной.

На рис. 5 представлены фазовые портреты пульсаций давления за падающей волной (а) и за отраженной волной (б) в одном и том же опыте. По горизонтальной оси отложено время в мкс, по оси  $p$  — изменение давления в произвольных единицах, по оси  $Dp$  — производная от давления по времени в произвольных единицах. В качестве произвольных единиц взяты показания в вольтах, снимаемые с пьезодатчика. Анализ этих портретов показывает, что радиус фазовой траектории  $R = (p^2 + p'^2)^{1/2}$  ( $p'$  — производная от давления по времени) за отраженной волной через некоторое время после взаимодействия ее с турбулентным потоком начинает убывать и уменьшается до конца процесса взаимодействия. Радиус  $R$  связан с интенсивностью вихревых колец. Падение их интенсивности указывает на уменьшение размера колец, что свидетельствует об их распаде. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом: в турбулентном потоке существуют акустические возмущения, возникающие при движении и взаимодействии вихревых колец. За отраженной волной эти возмущения усиливаются, происходит их резонансное рассеяние на вихревых кольцах. При этом последние становятся неустойчивыми, генерируют дополнительные возмущения [18]. Неустойчивость вихревых колец приводит к их распаду. Теневые картины, приведенные в работе [17], показывают азимутальные и радиальные колебания вихревого кольца, генерацию им акустических возмущений и его распад на более мелкие кольца. Уменьшение размера вихревых колец объясняет уменьшение масштаба турбулентности за отраженной волной.

Измерено давление  $p_3$  за отраженной ударной волной в ядре турбулентного потока воздуха и давление  $p'_3$  в ядре потока без турбулентных пульсаций давления при одних и тех же условиях. На рис. 6 даны эпюры

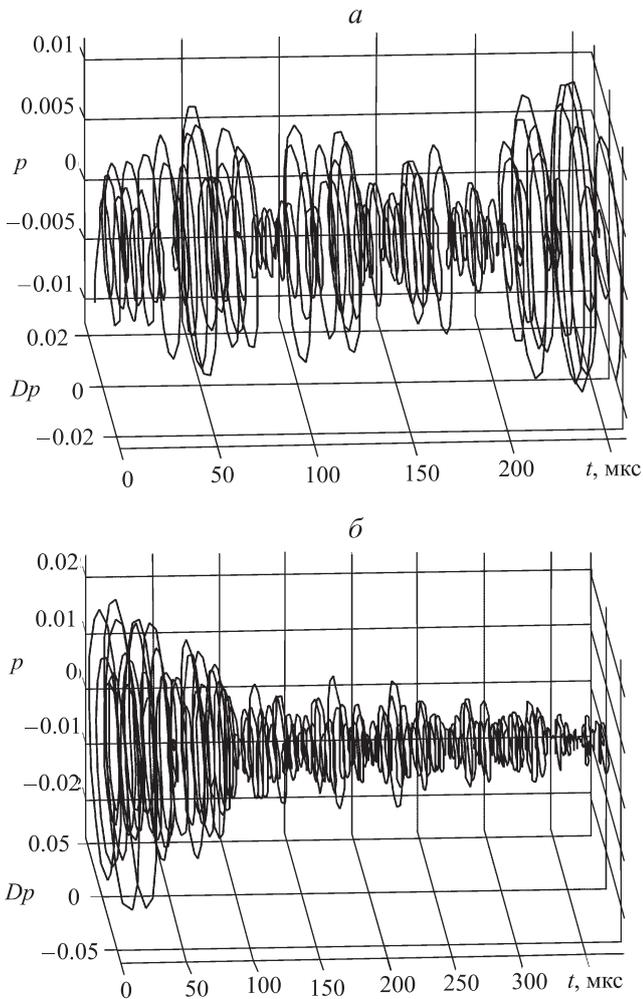


Рис. 5. Фазовые портреты пульсаций давления: *а* — за падающей волной; *б* — за отраженной волной. Давление  $p$  и производная по времени от давления  $Dp$  даны в произвольных единицах

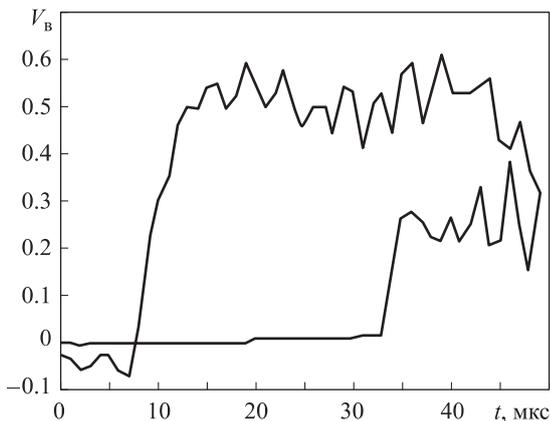


Рис. 6. Эпюры давления за падающей и отраженной волнами. Правый график — давление за падающей волной, левый график — за отраженной волной

давления за падающей и отраженной волной. Правая эпюра соответствует давлению за падающей волной, распространяющейся в потоке без турбулентных пульсаций. По оси абсцисс отложено время в мкс, по оси ординат — показания датчика давления в вольтах. На эпюре за отраженной волной (слева), распространяю-

щейся в турбулентном потоке, первый резкий подъем давления соответствует давлению за косой ударной волной в пограничном слое. Далее в ядре потока давление сначала растет медленно, а затем снова резко поднимается. Давление меняется вслед за изменением формы ударной волны. Эпюры давления различаются для разных чисел Маха отраженной волны, что говорит об изменении ее формы во время движения.

На рис. 7, *а, б* представлена зависимость величин  $p_3$  и  $p'_3$  от давления  $p_2$  перед отраженной волной. По оси абсцисс отложена величина  $p_2$  в кПа, по оси ординат — величины  $p_3, p'_3$  в кПа. Точки соответствуют экспериментальным данным, прямые проведены по методу наименьших квадратов. Рис. 7, *в* показывает разность давлений  $p_3 - p'_3$  как функцию величины  $p_2$ . Как видно из рис. 7, величина  $p_3$  превышает значение  $p'_3$  на 7–8% при изменении  $p_2$  от 25 до 45 кПа. При  $p_2 = 8$  кПа величины  $p_3$  и  $p'_3$  практически совпадают. Измерения за косой ударной волной подтверждают полученный результат. Увеличение давления за отраженной волной в турбулентном потоке воздуха можно объяснить

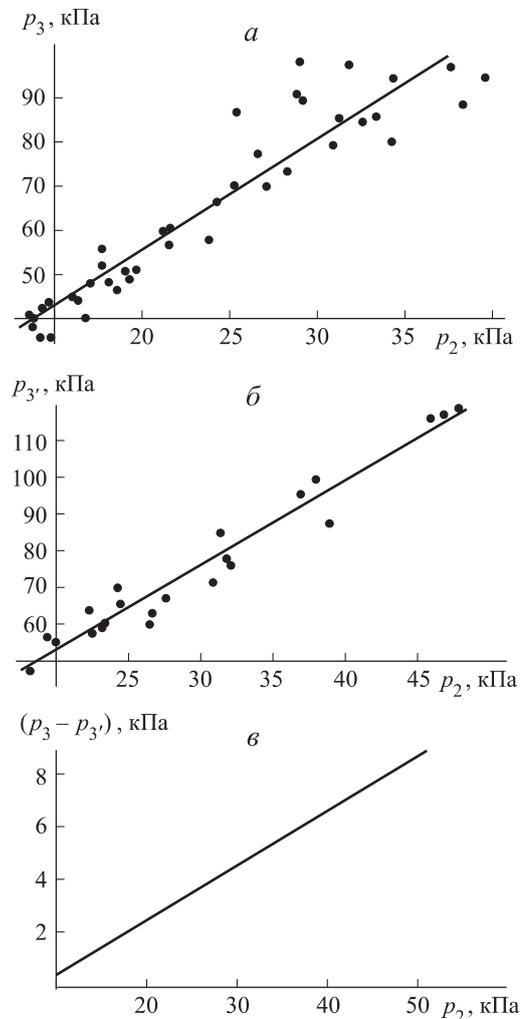


Рис. 7. Зависимость величин  $p_3$  и  $p'_3$  от давления  $p_2$  перед отраженной волной: *а* — зависимость  $p_3$  от  $p_2$ ; *б* — зависимость  $p'_3$  от  $p_2$ ; *в* — зависимость разности  $p_3 - p'_3$  от  $p_2$ , причем значения  $p_3, p'_3$  найдены с помощью линейной регрессии. Давление выражено в кПа

нагревом газа многочисленными акустическими возмущениями, присутствующими в нем, как показано выше. При малых давлениях в потоке интенсивность возмущений тоже мала и нагрев незначителен. При увеличении давления в потоке интенсивность возмущений возрастает и нагрев увеличивается. Возрастание амплитуды пульсаций давления за отраженной волной по сравнению с соответствующей величиной перед волной (коэффициент усиления) соответствует расчету в работе [13].

### Заключение

Как известно, турбулентные течения характеризуются уровнем пульсаций плотности, давления, скорости и масштабом турбулентных пульсаций. В проведенных экспериментах наряду с уровнем пульсаций давления определен один из основных параметров турбулентного течения — масштаб турбулентных пульсаций давления за падающей ударной волной. Он изменяется от 0.4 до 1.2 мм при увеличении числа Маха волны от 2 до 4. Безразмерный масштаб турбулентных пульсаций при этом меняется в пределах от 0.13 до 0.4, т.е. он меньше диаметра отверстий турбулизующей сетки. За отраженной волной турбулентный масштаб уменьшается на порядок.

Измерено давление за фронтом ударной волны в турбулентном потоке воздуха и в потоке без турбулентных пульсаций давления при одинаковых условиях опыта. Первое превышает второе на 7–8%. Дано объяснение этого эффекта. Данный результат получен впервые.

Впервые обнаруженное уменьшение интенсивности и размера вихревых колец с расстоянием за отраженной ударной волной указывает на усиление турбулентного перемешивания.

### Список литературы

1. Kovasznay L.S.G. // J. Aeronaut. Sci. 1953. **20**, N 10. P. 657.
2. Kistler A.L. // Phys. Fluids. 1959. **2**, N 3. P. 291.
3. Demetriades A. // Phys. Fluids. 1970. **13**, N 7. P. 1673.
4. Shatto D.P., Besly J.A., Peterson G.P. et al. // AIAA J. 1971. **9**, N 5. P. 826.
5. Секундов А.Н. // Механика жидкости и газа. 1974. № 2. С. 8.
6. Дербунович Г.И., Земская А.С., Реник Е.У., Соседко Е.П. // Уч. Зап. ЦАГИ. 1982. **13**, № 1. С. 11.
7. Михайлова Н.П., Реник Е.У., Соседко Е.П. // Механика жидкости и газа. 1994. № 3. С. 163.
8. Михайлова Н.П., Реник Е.У., Соседко Е.П. // Механика жидкости и газа. 2001. № 1. С. 79.
9. Comte-Bellot G., Corrsin S. // J. Fluid Mech. 1966. **25**, N 4. P. 657.
10. Agui J.H., Briassulis G., Andreopoulos Y. // J. Fluid Mech. 2005. **524**. P. 143.
11. Wintrich H., Merzkirch W. // Shock Waves IV. Proc. 19<sup>th</sup> Int. Symp. on Shock Waves. Marseille, France, 26–30 July 1993. P. 319.
12. Vitkin D., Merzkirch W., Fomin N. // J. Visualization. 1998. **1**, N 1. P. 29.
13. Азарова О.А. // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. **44**, № 3. С. 532.
14. Takagi D., Ito S., Takeya K. et al. // Proc. ISSW 28. Manchester, 17–22 July 2011.
15. Strehlow R., Cohen A. // J. Chem. Phys. 1959. **30**, N1. P. 257.
16. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М., 1977.
17. Shugaev F.V., Shtemenko L.S. Propagation and reflection of shock waves. Singapore, 1998.
18. Копьев В.Ф., Леонтьев Е.А. // Изв. АН СССР. Сер. Мех. жидкости и газа. 1987. **22**. С. 398.

### Pressure fluctuations within a turbulent gas flow and their interaction with a shock wave

O. I. Dokukina<sup>1</sup>, E. N. Terentiev<sup>2</sup>, L. S. Shtemenko<sup>1</sup>, F. V. Shugaev<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Quantum Statistics and Field Theory; <sup>2</sup> Department of Computer Methods in Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.  
E-mail: <sup>a</sup> shugaev@phys.msu.ru.

The interaction of a shock wave with a turbulent air flow is investigated experimentally. The turbulence was created with the aid of a grid. On its reflection from a perforated disc the wave propagated through a turbulent flow. The Mach number of the incident shock was equal to 1.9–4, the Mach number of the reflected wave was equal to 1.6–2.5. We found autocorrelation functions of pressure fluctuations and their phase diagrams. The turbulent length scale of pressure fluctuations behind the incident shock was determined. The appropriate quantity behind the reflected wave is less of an order as compared with the previous case. It is established that the pressure behind the reflected wave in the turbulent flow is 7–8% higher as compared with the pressure in the laminar flow, if other conditions are the same.

*Keywords:* shock waves, turbulent flow, vortex rings, acoustic waves, turbulent length scale.

PACS: 47.27.Ch.

Received 7 September 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2013).

### Сведения об авторах

1. Докукина Ольга Ивановна — ст. инженер; тел.: (495) 939-28-16, e-mail: shugaev@phys.msu.ru.
2. Терентьев Евгений Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-41-78, e-mail: teren@maryno.net.
3. Штеменко Людмила Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-16, e-mail: shugaev@phys.msu.ru.
4. Шугаев Федор Васильевич — докт. физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-28-16, e-mail: shugaev@phys.msu.ru.