

03;12

Оптическая диагностика динамических структур в ударных волнах

© П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2005 г.

Показана возможность применения оптической диагностики, основанной на лазерных доплеровских измерительных технологиях и лазерной визуализации динамических полей плотности, для исследования кинематических и структурных параметров ударных волн и воздушной среды, возмущенной ударными волнами. Выявлено существование динамических структур в ударной волне и измерена скорость их движения по волновому фронту. Сделано предположение о колебательной природе таких структур.

Среди проблем экспериментальной газодинамики одной из сложнейших является исследование ударных волн и вызванных ими возмущений в среде распространения [1]. В настоящей работе сообщается об обнаружении динамических структур, индуцированных на фронте ударной волны. В эксперименте использовалась портативная ударная труба, выполненная на базе пневматического ружья ИЖ-53. Калибр ствола $\varnothing 4.5$ mm, длина — 200 mm. Ударная волна формируется при разрыве диафрагмы из алюминиевой фольги толщиной 0.05 mm в один или два слоя. Использование пневморужья в качестве портативной ударной трубы обеспечивает простоту и высокую производительность экспериментальных исследований.

В эксперименте использовался модифицированный лазерный анемометр „Пульсар-3М“ [2], предназначенный для измерения $2D$ скоростей потоков газовых и конденсированных сред в динамическом диапазоне до 10^3 m/s. Отличительная особенность — верхняя граница динамического диапазона измеряемых скоростей, позволяющая применять прибор для исследования быстропротекающих нестационарных процессов в полосе частот до 250 MHz. Прибор состоит из оптико-механического блока и компьютеризованной системы обработки, содержащей высокоскоростную плату сбора данных. В качестве источ-

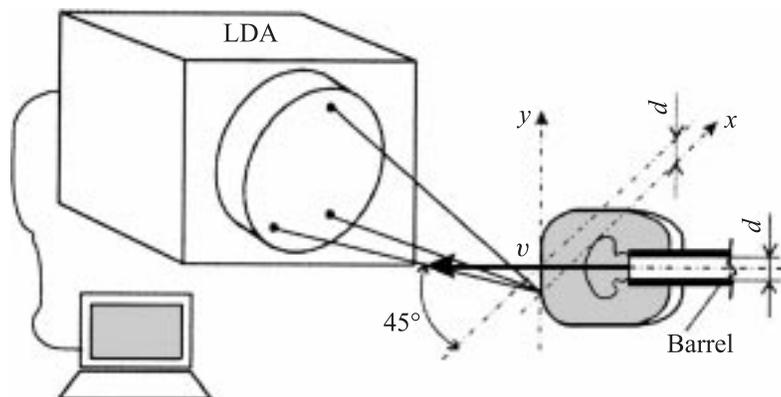


Рис. 1.

ника излучения используется гелий-неоновый лазер мощностью 15 mW, однако измеритель без существенной перестройки может работать с другими лазерными источниками, в том числе полупроводниковыми, излучающими в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

На рис. 1 показана упрощенная схема эксперимента, в котором ось ствола пневморужья направлена под углом 45° к плоскости xu $2D$ координатно-измерительного базиса, задаваемого зондирующим световым полем в системе отсчета, связанной с лазерным анемометром. В каждой реализации исследуемого процесса измерялась одна из двух ортогональных компонент вектора скорости. Коммутация оптических каналов, формирующих $2D$ координатно-измерительный базис, осуществляется акустооптическими модуляторами бегущей волны по заданной программе или от внешнего управляющего сигнала. Частота ультразвуковой волны в модуляторе 80 МГц. Динамическая структура зондирующего лазерного поля сформирована в приборе „Пульсар-3М“ таким образом, что вектор решетки, совпадающий с направлением движения интерференционных полос, был направлен противоположно измеряемым компонентам v_x и v_y вектора скорости ударной волны. Поэтому доплеровский сдвиг частоты в рассеянном исследуемой структурой свете, равный несущей частоте $f_0 = 80$ МГц, соответствует нулевой

скорости. Зондирующее поле локализовано в объеме, ограниченном эллипсоидом, малая полуось которого равна $25\ \mu\text{m}$, большая — $0.35\ \text{mm}$.

Доплеровский сигнал формируется при прохождении фронта ударной волны через зондирующее поле. Сигнал представляет собой короткий видеоимпульс, огибающая которого модулирована частотой, определяемой периодической структурой зондирующего поля и соответствующей компонентой скорости движения фронта ударной волны.

Кинематические возмущения в структуре ударной волны должны проявляться через динамическую скорость. С целью измерения этой скорости координатно-измерительный базис, задаваемый зондирующим лазерным полем, ориентировался так, чтобы ось y была параллельной плоскости волнового фронта.

На рис. 2, *a* в качестве примера показан один из фрагментов реализации доплеровского сигнала, полученный при измерении y -компоненты вектора скорости в плоскости волнового фронта ударной волны, когда зондирующее поле позиционировано на расстоянии 10 калибров от среза ствола. Существование y -компонент скорости в конфигурации, показанной на рис. 1, говорит о том, что лазерное излучение рассеивается оптическими неоднородностями, движущимися в плоскости волнового фронта.

Вид доплеровских сигналов, соответствующих y -компоненте скорости, указывает на упорядоченность структуры динамических возмущений фронта ударной волны. На рис. 2, *a* над сигналом приведен график, где точками показана зависимость от времени локальной скорости движения динамической рассеивающей структуры на фронте ударной волны. Временные интервалы, соответствующие сигналу и измеренной динамической скорости, согласованы. Из рисунка видно, что огибающая доплеровского сигнала промодулирована с переменной частотой. Измеряемая скорость есть однозначная функция этой частоты. Скорость на интервале $0.08\ \mu\text{s}$ изменяется от $300\ \text{m/s}$ до нуля и далее меняет знак. Одно из возможных объяснений состоит в том, что сигнал такого вида может возникать при рассеянии зондирующего поля на тангенциальной вращающейся динамической структуре.

Для выявления структуры фронта ударной волны были выполнены эксперименты с применением двумерного „лазерного ножа“ (лазерной плоскости). Лазерная плоскость формировалась излучением аргонового лазера (мощность $200\ \text{mW}$, $\lambda = 0.515\ \mu\text{m}$) на расстоянии 20 калибров от среза ствола. Ударная волна инициировалась разрывом диафрагмы из

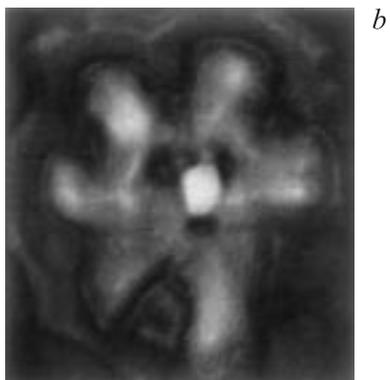
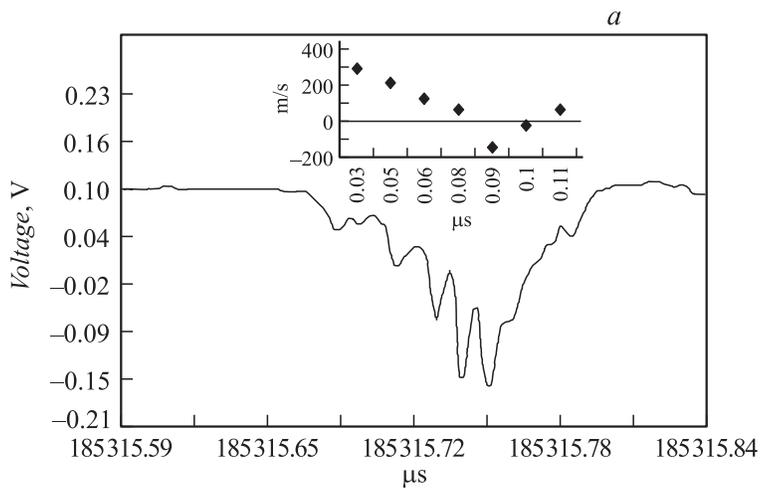


Рис. 2.

одинарной фольги. Цифровой фотокамерой регистрировалось прохождение ударной волны через лазерную плоскость. На рис. 2, *b* показан пример визуализированного фронта ударной волны при пересечении лазерной плоскости. Явственно просматривается радиально-тангенциальная модовая структура оптической плотности, что указывает на возможную колебательную природу таких структур.

С применением ЛДА „Пультсар-М“ исследовались динамические возмущения воздушной среды при распространении ударной волны. Возмущенные ударной волной частицы и оптические неоднородности, пересекая зондирующее поле, осуществляют случайную дискретизацию

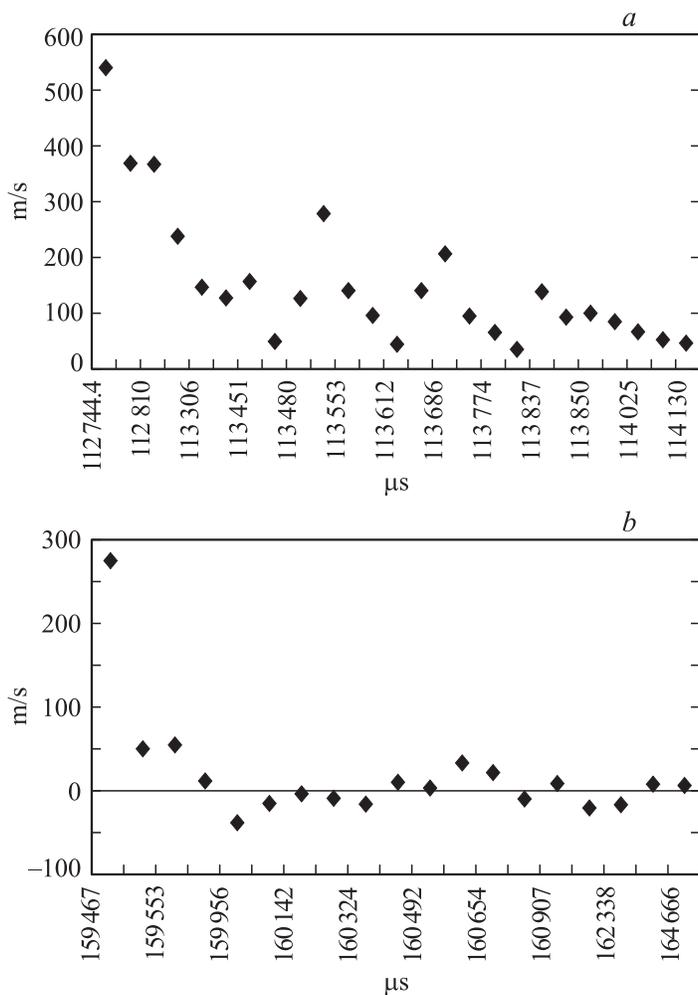


Рис. 3.

нестационарного процесса, отображающего динамическое состояние среды в пространственной области, ограниченной зондирующим полем. Обработка сигнала, соответствующего случайной выборке, дает информацию об эволюции локальной скорости в среде при распространении ударных волн.

На рис. 3 приведены примеры зависимости от времени локальной скорости воздушной среды, возмущенной ударной волной. Измерения выполнялись в геометрии, показанной на рис. 1. Зондирующее поле позиционировалось на расстоянии 10 калибров от среза ствола. Измерялась скорость по оси x в направлении распространения ударной волны (рис. 3, *a*) и скорость по оси y , параллельной плоскости волнового фронта (рис. 3, *b*). Эти результаты дают представление об эволюции ортогональных компонент локальной скорости в воздушной среде при распространении ударных волн.

Авторы выражают благодарность Е.Е. Мешкову, А.Л. Михайлову и В.М. Титову за поддержку работы и полезные обсуждения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 05-02-16896) и Интеграционным проектом СО РАН (№ 28).

Список литературы

- [1] Hous L., Vtirjd T.T., Jourdan G. // Shock Waves. 1999. N 9. P. 249–257.
- [2] Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. 418 с.