

О толщине фронта ударной волны при визуализации цифровыми методами

И.А.Знаменская¹, И.Э.Иванов¹

znamen@phys.msu.ru

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Цель данной работы – провести анализ возможностей измерения толщины фронта ударной волны 1) при ее экспериментальной визуализации в газодинамическом потоке различными оптическими методами и 2) при численном моделировании разрывных течений газа. Приведены результаты цифровой регистрации фронта ударной волны, движущейся со скоростью до чисел Маха $M=4,5$ на основе теневых методов с различной экспозицией; при использовании теневого фонового метода, интерферометрии, трассерной цифровой визуализации (PIV). Показано, что и в эксперименте, и в численных расчетах измеряемая толщина фронта ударной волны определяется совокупностью параметров течения, в том числе, скоростью движения ударной волны (относительно сетки или относительно регистратора), вязкостью среды (физической или схемной). На результаты экспериментальных измерений влияет время экспозиции, угол наблюдения.

Ключевые слова: ударная волна, плотность, поток, визуализация, вязкость.

On the visible thickness of the shock wave at digital imaging

I. A. Znamenskaya¹, I. E. Ivanov¹

znamen@phys.msu.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The purpose of this work is: to analyze the possibilities of the shock wave front thickness measuring 1) in experimental flow visualization of the gas dynamic flow using various optical methods and 2) in the numerical simulation of supersonic gas flow. The results of the moving shock wave with Mach number up to $M=4,5$ digital recording are presented. Images were recorded on the base of shadow methods with different time exposures; using BOS (background oriented schlieren), interferometry, Particle Image Velocimetry (PIV). It is shown that both in the experiment and in numerical calculations, the measured thickness of the shock wave front is determined by a set of flow parameters, including the shock wave velocity (relative to the grid or relative to the recorder); the medium viscosity (physical or schematic). The results of experimental measurements are influenced by exposure time, watching angle.

Keywords: shock wave, density, flow, visualization, viscosity.

1. Введение

Ударная волна в газовой среде представляет собой поверхность разрыва, которая движется внутри среды со скоростью, превышающей скорость звука. При этом давление, плотность, температура, скорость, энтальпия испытывают скачок. Величина скачка описывается соотношениями Ранкина – Гюгонио. В реальном газе фронт ударной волны имеет конечную толщину, определяемую рядом факторов. В частности, она зависит от плотности, давления скорости ударной волны, вязкости газа. Принято оценивать толщину фронта как величину порядка нескольких длин свободного пробега молекул (от 2 до 10). При этом, несмотря на наноразмерные параметры фронта, считать ударную волну “нанообъектом” никак нельзя, т.к. ее протяженность теоретически может быть бесконечна, а реально - в сотни и тысячи раз превышает толщину фронта. Такой объект движется мимо регистратора со сверхзвуковой скоростью. Ударная волна может рассматриваться как очень тонкий пограничный слой с большим потоковым градиентом скорости du/dx . Это накладывает определенные условия на методы регистрации изображения фронта ударной волны и ее визуализации при численном моделировании [1, 3, 7, 8, 9].

Методы визуализации, позволяющие зарегистрировать ударную волну, используют физические явления рефракции, рассеяния, поглощения, интерференции, люминесценции, ионизации.

Теневым методом и его разновидности (прямой теневой метод, шпирен метод, теневой фоновый метод, цветной теневой метод, а также интерферометрические методы) – основаны на рефракции. Рефракция – света это изменение направления световых лучей в среде с изменяющимся в

пространстве показателем преломления n . Явление рефракции позволяет визуализировать оптические неоднородности в твердых, жидких и газовых средах используя электромагнитное излучение различных длин волн.

При визуализации поля течения газа теневым методом изменение освещенности пропорционально степени изменения градиента плотности газа. Особые проблемы возникают при использовании явления рефракции для визуализации больших градиентов показателя преломления, в частности, на границах раздела сред, контактных поверхностях, ударных, взрывных волнах.

В данной работе рассмотрены некоторые методы и результаты визуализации ударных волн на основе рефракции, интерференции, трассирования (рассеяние) а также при численном моделировании течений с разрывами и возможности разрешения ширины фронта.

2. Регистрация изображений оптическими методами.

При наличии в потоке ударных волн, контактных разрывов - происходят отклонения луча на поверхности разрыва. Теневое изображение ударной волны представляет собой темную полосу со стороны набегающего потока, сменяющуюся яркой светлой полосой, интенсивность которой постепенно уменьшается.

Оптический показатель преломления среды n связан с локальной плотностью среды формулой Лоренц-Лорентца, которая для газов имеет вид:

$$\frac{n-1}{\rho} = k$$

где k -постоянная величина, для воздуха равная $0,22635 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$

При просвечивании области течения с переменной плотностью луч, распространяющийся параллельно оси z и проходящий через неоднородность, отклоняется от первоначального направления распространения на угол альфа

$$\alpha \cong \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} \ln n(x, y, z) dz$$

На фронте плоской ударной волны с числом Маха $M=2$ в воздухе давлением 75 торр. плотность газа скачком увеличивается примерно в 2,6 раз. При этом величина показателя преломления газа n увеличивается во столько же раз, до $7,8 \cdot 10^{-5}$. Ширина фронта УВ при данных условиях имеет порядок 10^{-5} см, градиент показателя преломления газа в направлении, перпендикулярном ее плоскости, имеет величину порядка 10^{-2} см^{-1} . Размер, соответствующий ширине фронта ударной волны, соответствует элементу изображения меньше одного пикселя.

При использовании монохроматических когерентных источников (лазеров) имеет место эффект дифракции света параллельно к плоскости её фронта или под малым углом; либо регистрация осуществляется вне границ применимости теневого методов.

На рисунке 1 приведено распределение интенсивности света на фронте ударной волны, полученное с помощью высокоскоростной съемки, соответствующее ему изменение интенсивности и плотности газа вдоль фронта. Для зондирования потока использовался белый источник света. Экспозиция кадра около 1 микросекунды.

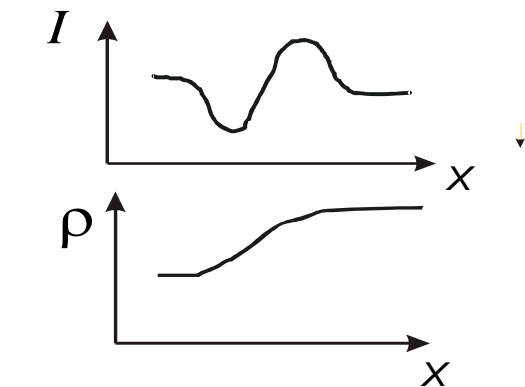
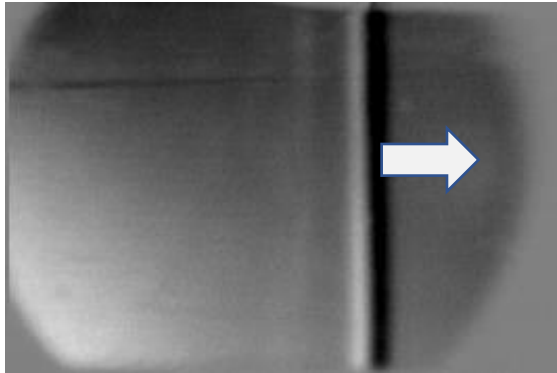


Рис. 1. Теневое изображение ударной волны в канале

При использовании монохроматических когерентных источников (лазеров) имеет место эффект дифракции света на фронте ударной волны. Это связано с тем, что длина волны света имеет тот же порядок, что и толщина фронта ударной волны. Изображение ударной волны, полученное с лазерным источником света с длиной волны 532 нм

приведено на рис 2. Видна широкая центральная темная полоса и несколько полос параллельных убывающей интенсивности.

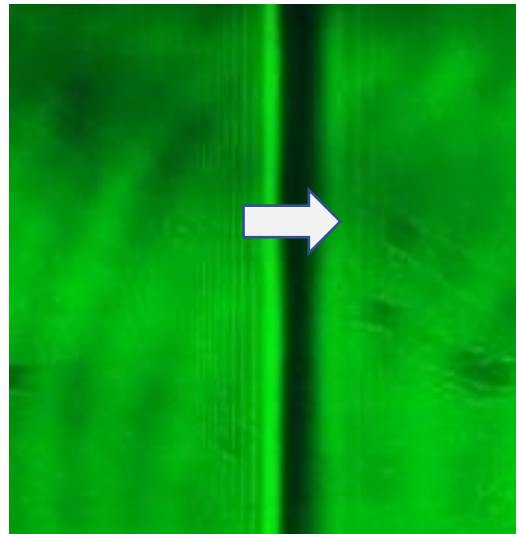


Рис. 2. Изображение ударной волны при зондировании монохроматическим источником

На 3 приведены результаты съемки и кросс-корреляционной обработки фронта ударной волны $M=2,2$ теневым фоновым методом. Было показано [3,4], что при углах наблюдения менее 4° метод становится практически неприменим для регистрации плоского фронта ударной волны.

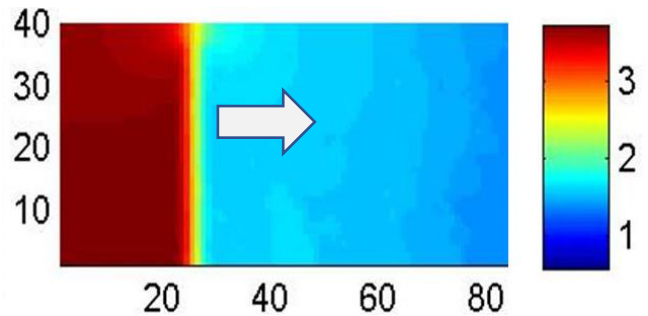


Рис. 3. Изображение плоской ударной волны при регистрации теневым фоновым методом.

При анализе интерферограмм большую сложность представляет определение изменения плотности при переходе через поверхность разрыва, особенно для плоских течений. На толщине ударной волны трудно или же невозможно установить соответствие полос на интерферограммах при переходе через ударную волну при съемке с монохроматическим источником света. Для решения этой проблемы существуют специальные методы интерферометрических измерений. На рисунке 4 приведена интерферограмма плоской ударной волны, полученная с помощью интерферометра Маха – Цендера.

На рисунке 5 приведено изображение фронта ударной волны, выходящей из канала ударной трубы, полученное методом анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry - PIV) и поля скоростей за ней. Приведен профиль распределения скорости потока вдоль оси симметрии течения в области ударной волны. Описание эксперимента приведено в работе [6]. Толщина фронта, зарегистрированная этим методом на основании регистрации скачка скорости газа, может составлять 2-4 мм.

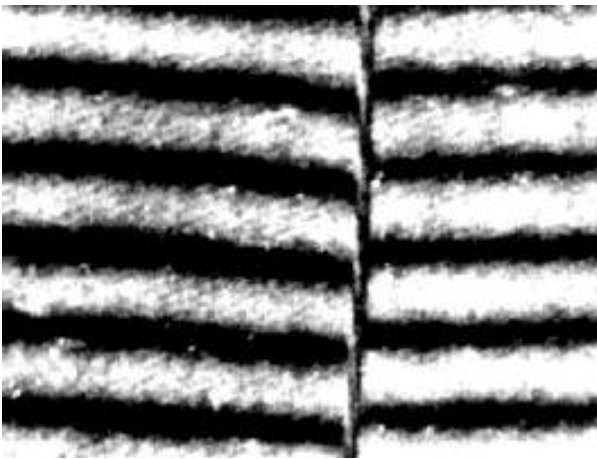


Рис. 4. Интерферограмма плоской ударной волны.

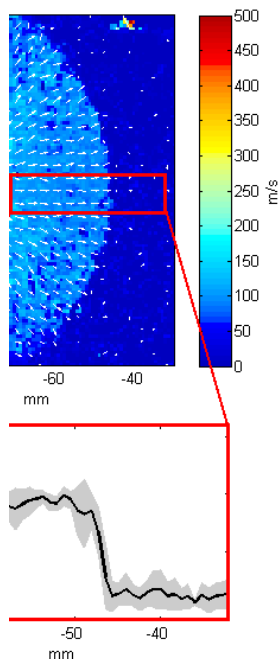


Рис. 5. PIV изображение и профиль ударной волны.

3. Регистрация ударных волн при изменении скорости движения.

При движении ударной волны толщина фронта при постоянной экспозиции существенно зависит от скорости волны. На рисунке 6 приведены 4 последовательных теневых изображения плоской ударной волны до и после явления распада разрыва на границе газ-плазма при инициировании наносекундного разряда в канале [5]. Съемка велась высокоскоростной камерой, интервал между кадрами 4 мкс, экспозиция около 1 мкс. После импульсного объемного разряда плоская исходная волна S_0 , двигавшаяся с числом Маха 4.4 распадается на 3 плоских разрыва: две ударные волны и контактную поверхность. Налево навстречу потоку движется ударная волна с нулевой скоростью относительно регистратора. Она имеет минимальную толщину менее 1 мм, исходная волна имеет толщину в 5-6 раз больше. Движущаяся направо волна имеет скорость в 2 раза меньше, чем исходная и соответствующую толщину на изображении.

Проведены цифровая обработка изображений и измерения толщины фронта в зависимости от положения фронта ударной волны при постоянной экспозиции. По полученным данным проведена оценка скорости разрывов на основе измерения относительной ширины фронта.

4. Численное моделирование.

В численных расчетах толщина фронта УВ определяется схемной (численной) вязкостью, которая зависит от размера расчетных ячеек в направлении перпендикулярном фронту УВ, от параметров разностной схемы (порядка аппроксимации) и некоторых других факторов (скорость движения УВ относительно сетки) [2].

Как правило, при старте расчета от разрывных начальных данных на нескольких временных шагах формируется характерная S – образная структура фронта ударной волны, которая остается примерно одинаковой при распространении волны по равномерной сетке.

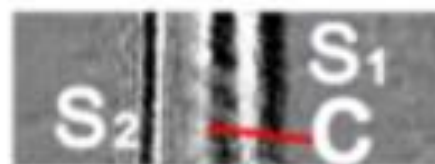
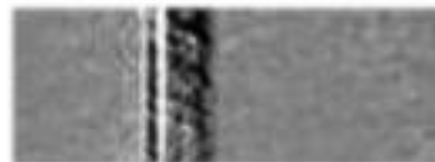


Рис. 6. Связь ширины фронта ударной волны с ее скоростью при явлении распада разрыва.

Для современных схем второго и более порядка точности толщина фронта составляет 3-5 расчетных ячеек для фронтов движущихся ударных волн и 1-2 ячейки для фронтов стационарных волн.

Если размер ячейки расчетной сетки в направлении перпендикулярном фронту ударной волны станет соизмерим с длиной свободного пробега молекул среды при условиях как перед фронтом, так и после фронта, то в численном расчете с помощью решения уравнений Навье-Стокса воспроизводится с некоторыми погрешностями структура фронта ударной волны с числами Маха меньше 4. Для больших чисел Маха погрешности существенно возрастают в силу необходимости учета физических процессов.

На рисунках 7 - 9 приведены изображения фронта плоской ударной волны при движении по невозмущенному газу при численном моделировании ее движения в канале. Приведены три различных типа представления фронта ударной волны, визуализирующие градиенты соответствующих параметров в области разрыва.

5. Заключение

Проведен анализ толщины фронта ударной волны при экспериментальной визуализации в потоке различными оптическими методами и при численном моделировании сверхзвуковых течений. Приведены изображения ударной волны, полученные на основе теневых методов с различной экспозицией, с использованием теневого фонового метода, интерферометрии, трассерной цифровой визуализации (PIV).

Показана аналогия экспериментальной и численной визуализации фронта ударной волны; если размер ячейки расчетной сетки соизмерим с длиной свободного пробега молекул среды то в численном расчете структура фронта воспроизводится с некоторыми погрешностями; на измеренное значение толщины фронта влияет длина волны зондирующего монохроматического зондирующего излучения; толщина фронта УВ определяется, в том числе, скоростью движения УВ (относительно сетки или относительно регистратора), вязкостью среды (физической или схемной).

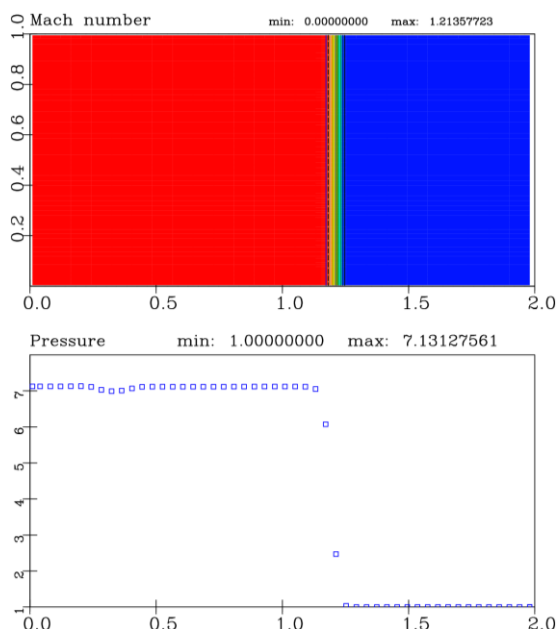


Рис. 7. Изменение числа Маха и давления на фронте ударной волны

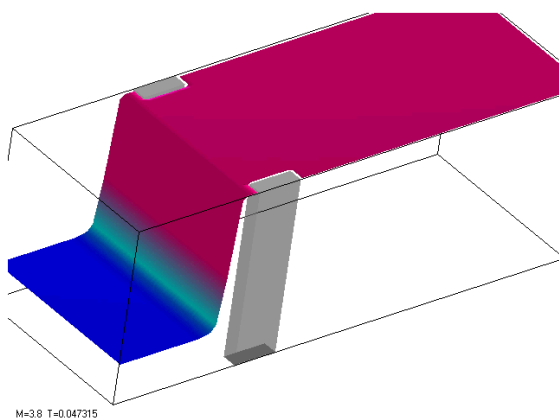


Рис. 8. Изменение плотности на фронте ударной волны в 3D представлении

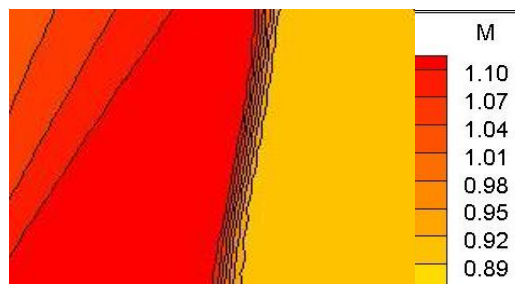


Рис. 9. Изменение числа Маха на фронте ударной волны

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант 18-19-00672)

7. Литература

- [1] Ван Дайк. Альбом течений жидкости и газа // М.: Мир, 1986. VanDyke. An Album of Fluid Motion // Parabolic Press. 1982.
- [2] Волков К.Н., Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике. Издательство: ФИЗМАТЛИТ 2017.
- [3] Знаменская И. А., Коротева Е. Ю., Глазырин Ф. Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки // Научная визуализация. — 2018. — Т. 10, № 4. — С. 100–108.
- [4] Глазырин Ф.Н., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В. и др. Исследования ударно-волнового течения в канале теневым и теневым фоновым методами // Автометрия. 2012. Т.48. №3. С.101–110.
- [5] Doroschenko. Igor, Znamenskaya. Irina, Koroteev. Dmitry, Kuli.-zade. Tahir. When shock is shocked: Riemann problem dynamics at pulse ionization of a shock wave // Physics of Fluids. — 2017. — Vol. 29, no. 10.
- [6] Glazyrin F. N., Mursenkova I. V., Znamenskaya I. A. PIV tracer behavior on propagating shock fronts // Measurement Science and Technology. — 2016. — Vol. 27, no. 1. — P. 1–10.
- [7] Hargather J., Settles S. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques // Meas. Sci. Technol 2017. V. 28. N. 4.
- [8] Havermann M., Haertig J., Rey C., et al. PIV Measurements in Shock Tunnels and Shock Tubes // Particle Image Velocimetry. 2008. V. 112. P. 429-443.
- [9] Kleine H. Filming the invisible—time-resolved visualization of compressible flows // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2010. V.182, Is. 1, P. 3–34.

Об авторах

Знаменская Ирина Александровна, д.ф.-м.н., профессор кафедры молекулярной физики и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета. e-mail: znamen@phys.msu.ru

Иванов Игорь Эдуардович, к.ф.-м.н., доцент кафедры молекулярной физики и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета. e-mail: ivanovmai@gmail.ru