

03

Особенности бифуркации отраженной ударной волны на игле

© В.П. Фокеев

Научно-исследовательский институт механики,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: vfokeev@imec.msu.ru

Поступило в Редакцию 13 января 2015 г.

В ударной трубе квадратного сечения (98×98 мм) проведено исследование осесимметричной бифуркации отраженной ударной волны в результате взаимодействия волны с пограничным слоем на игле длиной 79 мм и диаметром 1.1 мм, установленной на торце ударной трубы навстречу потоку. Представлены экспериментальные данные параметров бифуркации в углекислом газе при начальном давлении 4 кПа и числе Маха падающей ударной волны $M = 2.5$. Полученные данные сопоставляются с параметрами бифуркации отраженной ударной волны на боковых стенках канала ударной трубы. Данные получены с помощью шпирен-визуализации картин течения и фоторегистрации цифровой камерой DICAM-Pro в режиме 2-кадровой съемки.

Нестационарное взаимодействие ударной волны с газовой неоднородностью во многих случаях сопровождается перестройкой течения и формированием сложных газодинамических структур. Одним из типов неоднородности является пограничный слой, формирующийся на твердой границе за падающей ударной волной. Взаимодействие нестационарной ударной волны с пограничным слоем активно исследовалось для плоского двумерного течения и практически совсем не исследовалось для осесимметричного течения. Исследования проводились в ударных трубах, где взаимодействие отраженной от торца трубы ударной волны с пограничным слоем на стенках канала трубы в определенных случаях приводит к отрыву пограничного слоя и формированию λ -конфигурации ударных волн. Такая трансформация скачка получила название бифуркации отраженной ударной волны. Это приводит к характерному изменению параметров течения в окрестности торца ударной трубы по сравнению с параметрами по теории одномерного течения идеального газа в ударной трубе. Разница в значениях этих параметров, в том

числе и состава газа, в некоторых случаях критична для кинетических исследований. Кроме того, интенсивное циркуляционное движение газа в отрывном пузыре может быть определяющим в механизме подъема и вовлечение в поток мелкодисперсных частиц с твердой поверхности.

Исследование бифуркации для плоского течения позволило собрать надежный массив данных, который обычно сопоставлялся с моделью бифуркации, предложенной в ранней работе [1,2]. В экспериментах по бифуркации в ударных трубах круглого сечения методы визуализации всей картины течения исключены, и исследования при этом в основном проводятся с помощью измерения давления в области бифуркации волны, а частично и оптической регистрацией возмущений потока вдоль оси трубы [3,4]. Полученные данные используются для расчета ударно-волновой конфигурации в соответствии с [1,2] с выявлением эмпирических зависимостей для эволюции λ -конфигурации волн [3]. Численные методы успешно используются для исследования бифуркации в трубах круглого сечения, что позволяет выявить особенности этого сложного явления, особенно в случае, когда масштабы области бифуркации и диаметра круглой трубы сопоставимы [5].

Особым вариантом осесимметричной бифуркации остается практически не исследованная бифуркация отраженной ударной волны на стержне-игле, выступающей из торца ударной трубы. В работе [6] было обнаружено существенное превышение высоты λ -конфигурации зоны бифуркации на игле по сравнению с бифуркацией на стенках канала. Однако значения других параметров бифуркации оставались невыясненными.

В цикле исследований бифуркации отраженной ударной волны на тонком остром стержне в Институте механики МГУ эксперименты проводились в ударной трубе квадратного сечения 98×98 mm, в углекислом газе при интервале начального давления 1.33–13.3 kPa. В данной работе начальное давление в камере низкого давления ударной трубы составляло 4 ± 0.1 kPa, а число Маха падающей ударной волны $M = 2.5 \pm 0.1$. Длина иглы использовалась в оценке числа Рейнольдса, которое оказалось порядка 400 000. Стальная полированная игла длиной 79 mm и диаметром 1.1 mm располагалась по оси ударной трубы на торце экспериментальной секции в поле зрения теневого прибора TE-19 (диаметр светового поля 150 mm, положение ножа Фуко — вертикальное). Фоторегистрация выполнялась цифровой камерой DICAM-Pro в режиме двухкадровой съемки. Ряд пьезоэлектрических

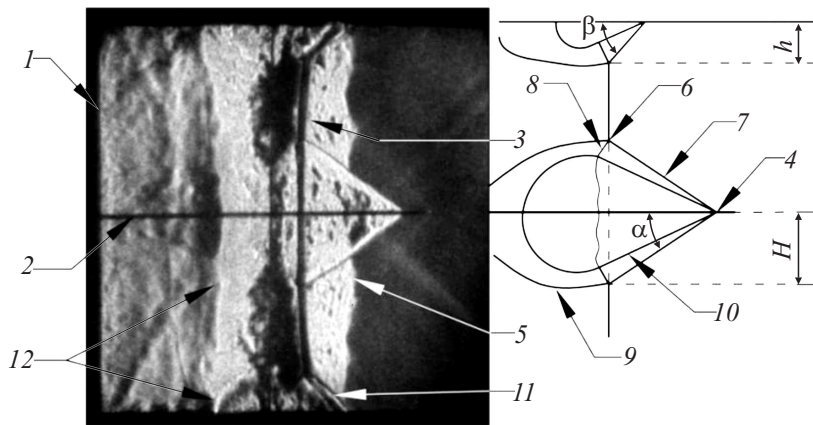


Рис. 1. Теплеровская картина при бифуркации ударной волны на игле и стенках канала (слева) и схема фрагмента течения (справа) с обозначениями характерных областей течения.

датчиков, расположенных в стенке ударной трубы, использовался для регистрации скорости падающей ударной волны и давления на боковой стенке экспериментальной секции канала в области бифуркации волны. Шлирен-визуализация картины течения в квадратной ударной трубе позволяет зарегистрировать параметры как осесимметричной бифуркации на игле, так и бифуркации на стенках канала. Удовлетворительная воспроизводимость интенсивности падающей ударной волны позволяет проследить эволюцию во времени процесса взаимодействия отраженной ударной волны с пограничным слоем на стенках канала и на игле при фиксированном значении числа Маха падающей ударной волны. В действительности зависимость бифуркации от числа Маха падающей ударной волны является достаточно заметной [7,8].

На рис. 1 представлены пример бифуркации отраженной ударной волны (слева) и соответствующая схема фрагмента картины течения (справа). Теплеровская картина бифуркации волны на стенках канала и на игле получена для начальных условий в ударной трубе: давление CO_2 — 8 кПа, температура 298 К, число Маха падающей ударной волны $M = 2.3$, время распространения отраженной волны от торца трубы $220 \mu\text{s}$. На фотографии и схеме фрагмента фотографии даны следующие

обозначения: 1 — торец ударной трубы; 2 — игла, на которой в потоке за падающей ударной волной формируется пограничный слой, отрывающийся с образованием отрывного пузыря в зоне бифуркации; 3 — отраженная от торца ударная волна, распространяющаяся слева направо, соответствующей штриховой линией на схеме показан след падающей ударной волны, окружающей область бифуркации в центральной части течения; 4 — место отрыва пограничного слоя на игле; 5 — линия отрыва на окне экспериментальной секции ударной трубы; 6 — тройная точка λ -конфигурации ударных волн; 7 — передняя коническая ударная волна бифуркации на игле; 8 — задняя коническая ударная волна бифуркации на игле; 9 — контактная поверхность, исходящая из тройной точки 6; 10 — коническая вихревая пелена, отделяющая газ в потоке за передней волной 7 от газа в отрывном пузыре; 11 — передняя косая ударная волна бифуркации на плоской боковой стенке канала; 12 — задний край отрывного пузыря по периметру канала на стенках и окне канала; H и h — высоты бифуркации от поверхности иглы и от боковой стенки трубы соответственно; α и β — полуугол раскрытия конуса передней волны бифуркации на игле и угол наклона передней волны на стенке трубы соответственно.

Фотография исследуемого процесса позволила выявить ряд новых особенностей подобного течения. Во-первых, точка отрыва на игле (4) заметно опережает линию отрыва на боковой стенке канала (на окне) (5) и высота бифуркации на игле (H) превышает высоту бифуркации на верхней и нижней стенках канала (h). Во-вторых, линия отрыва на окне (5) имеет хаотичные искривления, что, по-видимому, связано с турбулентностью пограничного слоя. Влияние этой турбулентности на параметры отрывной зоны экспериментально исследуется в работе [9]. Эта же искривленность линии отрыва на верхней и нижней стенках канала в некоторых случаях связана с „удвоением“ передней волны бифуркации, особенно заметным на фотографии в окрестности нижней стенки канала (11). Кроме того, сложное трехмерное течение в окрестности углов канала (см. численное исследование [10]) сопровождается отставанием линии отрыва вблизи угла канала, что особенно выражено в узких каналах [11], когда полувисота канала сравнима с высотой бифуркации. Линия отрыва по периметру иглы (4) существенно меньше масштаба неоднородности линии отрыва на окне, но в ряде опытов наблюдается заметное изменение угла наклона (искривление) передней волны бифуркации (7) на игле, но, скорее, вследствие сильной

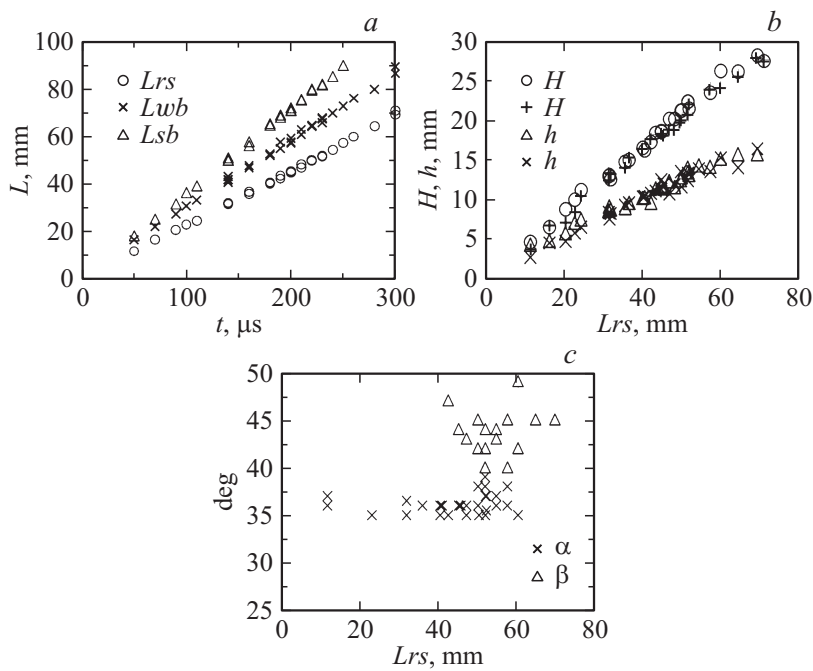


Рис. 2. Эволюция характерных параметров при бифуркации отраженной ударной волны от торца ударной трубы в углекислом газе при начальном давлении 4 кПа и числе Маха падающей волны $M = 2.5$ на игле и стенках канала. *a* — отход от торца ударной трубы отраженной ударной волны Lrs , линии отрыва на стенке канала Lwb и точки отрыва на игле Lsb в зависимости от времени; *b* — высота бифуркации на игле сверху и снизу H (кружки и прямые кресты соответственно) и на верхней и нижней стенках канала h (треугольники и косые кресты соответственно) в зависимости от отхода отраженной ударной волны Lrs от торца ударной трубы; *c* — величины передних углов бифуркации на игле (α) и на стенках канала (β) в зависимости от Lrs .

турбулентности в области циркуляционного течения под вихревой пеленой (10) в отрывном пузыре.

Эволюция параметров бифуркации при движении ее от торца канала отражена на рис. 2. Рис. 2, *a* характеризует отход Lrs отраженной ударной волны от торца трубы, усредненной линии отрыва на стенке канала

(окне визуализации) Lwb и точки отрыва на игле Lsb пройденного пути от торца в зависимости от времени $t\mu$, от момента отражения от торца ударной трубы. Соответствующие скорости распространения, т.е. изменения Lrs , Lwb и Lsb , равны 230, 280 и 360 ± 20 m/s.

Наиболее показательным параметром бифуркации является высота области течения, на которую распространяется влияние процесса отрыва пограничного слоя, т.е. параметры траектории тройной точки λ -конфигурации бифуркации. Она регистрировалась в экспериментальных исследованиях в различных газах для плоского течения [6–8,11,12]. В экспериментах, как и в численных трехмерных расчетах [13] для труб прямоугольного сечения, данные представлены для центральной части боковой стенки канала. Траектории тройных точек в виде зависимости ее высоты H (mm) на игле в верхней и нижней частях бифуркации и h mm на верхней и нижней стенках канала от расстояния до торца Lrs (mm) представлены на рис. 2, *b*. Из рисунка видно, что на расстоянии около 60 mm от торца замедляется рост высоты бифуркации на стенках канала, в то время как величина бифуркации на игле (H) продолжает расти, хотя толщина пограничного слоя при приближении к носику иглы уменьшается.

Углы наклона передних волн λ -конфигураций, являющиеся одним из важных параметров бифуркации, вместе со скоростями перемещения точек отрыва и набегающего за падающей ударной волной потока определяют первый скачок давления при прохождении области бифуркации. На рис. 2, *c* представлены значения угла α наклона передней волны бифуркации в окрестности точки отрыва на игле (сверху и снизу иглы) на различных расстояниях от торца трубы. Этот угол с начала отражения изменяется слабо и составляет $36^\circ \pm 1^\circ$. Но при приближении к носику иглы возможно искривление волны с увеличением и этого угла и разброса его значения. Угол передней волны бифуркации на стенке β имеет гораздо больший разброс вследствие искривленности и неопределенности фиксации линии отрыва на стенке и составляет $44 \pm 4^\circ$.

Таким образом, экспериментально получены новые количественные характеристики явления осесимметричной бифуркации на игле отраженной ударной волны в описанных здесь условиях для квадратной ударной трубы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-11-00773).

Автор благодарен академику В.А. Левину за поддержку в работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] *Mark H.* // *J. Aerospace Sci.* 1957. V. 24. N 4. P. 304–306.
- [2] *Mark H.* The Interaction of a Reflected Shock Wave with the Boundary Layer in a Shock Tube. NASA. TM-1418. Cornell University. 1958. 128 p.
- [3] *Petersen E.L., Hanson R.K.* // *Shock Waves.* 2006. V. 15. P. 333–340.
- [4] *Fokeev V.P., Abid S., Dupre G.* et al. // *Shock Waves Marseille IV. Proceeding of the 19th Intern. Symp. on Shock Waves*, eds R. Brun, L.Z. Dumitrescu. 1993. P. 145–150.
- [5] *Булович С.В., Виколайнен В.Э., Зверинцев С.В., Петров Р.Л.* // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33. В. 4. С. 73–78.
- [6] *Fokeev V.P., Gvozdeva L.G.* // *Current Topics in Shock Waves. The 17th Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes*, PA, ed. Y.W. Kim, AIP, N.Y. 1989. P. 862–866.
- [7] *Matsuo K., Kawagoe S., Kage K.* // *Bull ASME.* 1974. V. 17. N 110. P. 1039–1046.
- [8] *Honda M., Takayama K., Onodera O., Kohama Y.* // *Modern Developments in Shock Tube Research. Proc. of the 10th Intern. Shock Tube Symposium* / Ed. Kaminoto. Japan. Shock Tube Research Society. 1975. P. 320–327.
- [9] *Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Маслов А.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. В. 3. С. 23–30.
- [10] *Gamezo V.N., Oran E.S., Khokhlov A.M.* // *Proc. Combustion Institute.* 2005. V. 30. P. 1841–1847.
- [11] *Фокеев В.П., Харитонов А.И.* // *Известия РАН. МЖГ.* 2001. № 5. С. 169–176.
- [12] *Davies L., Wilson J.L.* // *Phys. Fluids.* 1969. V. 12. N 5. Pt 2. P. 37–42.
- [13] *Weber Y.S., Oran E.S., Boris J.P., Anderson J.D.* // *Phys. Fluids.* 1995. V. 7. N 10. P. 2475–2488.