

03;12

Увеличение коэффициента восстановления полного давления в потоке за ударной волной, выходящей из канала с вогнутыми углами в поперечном сечении

© Т.В. Баженова, В.В. Голуб, А.Л. Котельников,
А.С. Чижиков, М.В. Брагин

Институт теплофизики экстремальных состояний объединенного
института высоких температур РАН, Москва
E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2002 г.

Приведены результаты экспериментального исследования воздействия на преграду ударных волн, выходящих из каналов с выпуклыми и вогнутыми углами в поперечном сечении. Анализ структуры потока проведен путем высокоскоростной съемки теневых картин. Определены потери полного давления в потоке путем измерения давления на преграде, установленной перпендикулярно оси потока. Установлено, что потери полного давления при торможении потока при истечении из канала с X-образной формой поперечного сечения значительно меньше, чем при истечении из канала с круглой или квадратной формой поперечного сечения.

При взаимодействии с преградой ударных волн, выходящих из каналов, на первом этапе преобладает кратковременное действие отраженной от преграды волны, на втором — действие струи истекающего из канала газа. С увеличением расстояния до преграды по мере ослабления ударной волны превалирует действие сверхзвукового потока. Действие на преграду сверхзвукового потока ослабляется потерями на скачке торможения [1]. Пути создания оптимальной ударно-волновой системы для получения максимального коэффициента восстановления рассмотрены теоретически в работах [2,3]. Наименьшие потери могут быть достигнуты при такой геометрии течения, когда взаимодействие

волн разрежения и уплотнения приведет к уничтожению прямого скачка.

В работах [4,5] была отмечена зависимость бочкообразной структуры сверхзвуковой струи от формы поперечного сечения сопла. Форма канала определяет структуру вееров разрежения, что оказывает влияние на интенсивность и размеры прямого скачка. Эксперименты и расчеты показали, что в трехмерном случае, например при выходе ударной волны из канала квадратного сечения, взаимодействие волн разрежения и скачков уплотнения создает сложное нестационарное трехмерное поле течения, и структура потока изменяется по-разному в разных направлениях [6]. При дифракции сильных ударных волн на выпуклом прямом угле при выходе из канала квадратного сечения в направлении углов квадрата возникают зоны пониженного давления [7]. При взаимодействии с преградой ударной волны, выходящей из канала с квадратным сечением, интерференция волн разрежения, исходящих из выпуклых углов канала, и увеличение числа Маха потока перед скачком торможения способствуют увеличению потерь полного давления по сравнению с потерями при выходе ударной волны из канала круглого сечения [8,9].

В данной работе исследовано взаимодействие с преградой ударных волн, выходящих из канала с вогнутыми углами в поперечном сечении, а именно с крестообразной формой поперечного сечения по всей длине. Экспериментальная установка состояла из ударной трубы, соединенной с цилиндрической вакуумной камерой. На торце ударной трубы устанавливался фланец с каналом круглого, квадратного или крестообразного сечения, располагающимся внутри трубы. Торцы ударной трубы размещались напротив плоскопараллельных оптических окон барокамеры. В камере устанавливалась плоская преграда с координатным механизмом, позволяющим варьировать расстояние от среза канала до преграды. Камера низкого давления и вакуумная камера наполнялись воздухом до давления $p_0 = 4.0$ кПа. Измерение скорости ударной волны проводилось базовым методом с точностью 1.2%.

Для сравнения изменения полного давления в потоке при выходе ударной волны из каналов с различной формой сечения расстояния от среза канала до преграды были определены условием их равенства в эффективных калибрах. Для круглого сечения эффективный калибр d — диаметр круга d_0 , для квадратного и крестообразного — диаметр круга, эквивалентного по площади ($d = 1.125d_0$ и $d = 1.08d_0$). При

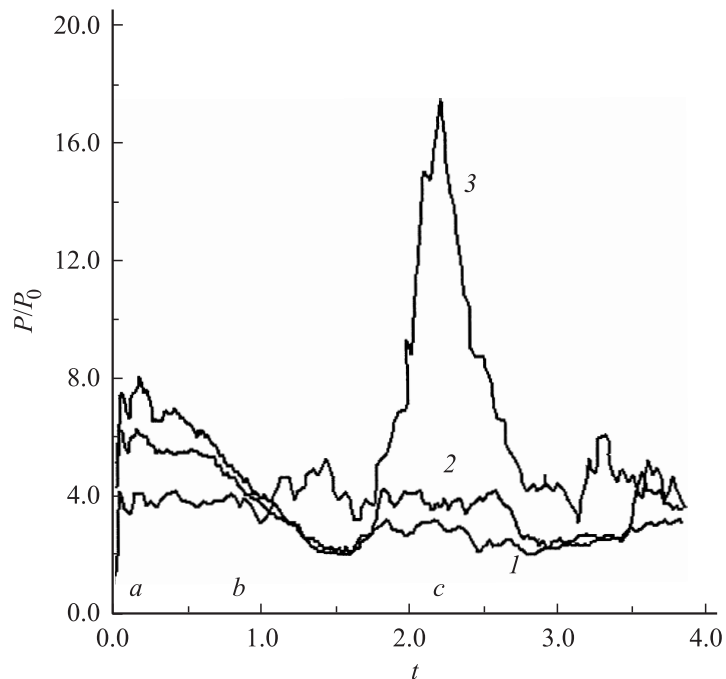


Рис. 1. Осциллограммы давления в центральной точке преграды при воздействии на нее ударной волны, выходящей из каналов квадратного (1), круглого (2) и крестообразного (3) сечения. Число Маха первичной ударной волны $M_0 = 3.05$.

исследовании взаимодействия с преградой ударной волны, вышедшей из каналов различного сечения, преграда устанавливалась на расстояниях, соответствующих четырем калибрам.

На преграде в центральной точке потока был установлен датчик давления „Kistler-603В“. Визуализация картины течения производилась с помощью теневого прибора ИАБ-451 и оптомеханической высокоскоростной камеры ВСК-5. С целью определения зависимости от геометрии канала потерь полного давления при торможении потока на преграде проведено сравнение осциллограмм давления и теплерограмм при различных формах сечения канала (рис. 1, 2). Сравнение проводилось в

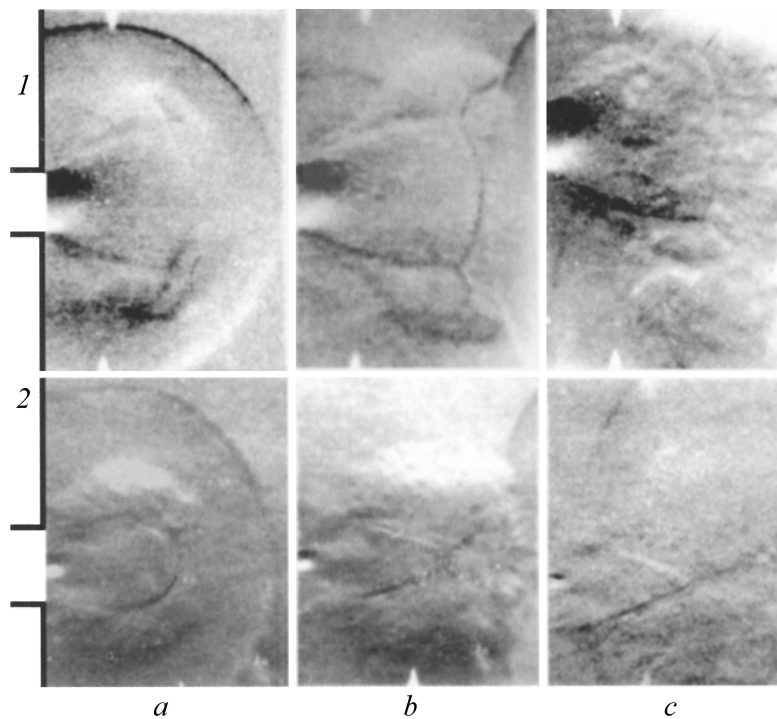


Рис. 2. Теневые фотографии взаимодействия с преградой ударной волны, выходящей из каналов круглого сечения, $M_0 = 3.08$ (1) и крестообразного сечения, $M_0 = 2.80$ (2), *a* — до взаимодействия с преградой, *b, c* — через время $t = 0.7$ и 2.2 после отражения фронта ударной волны от преграды.

безразмерном времени t , которое связано с размерным τ соотношением: $t = (\tau/d)\sqrt{p_0/\rho_0}$, где p_0 и ρ_0 — давление и плотность невозмущенного газа.

На осциллограммах давления (рис. 1) в случае каналов круглого и квадратного сечения можно выделить следующие общие участки: *a* — ступенька давления — начало взаимодействия первичной дифрагированной ударной волны с преградой, *b* — спад — изменение параметров за отраженной сферической ударной волной, *c* — постоянные параметры в замкнутой дозвуковой области, ограниченной фронтом

волны торможения, отраженным скачком и преградой. При истечении из крестообразного канала на участках a и b давление постоянно и меньше, чем в случае каналов круглого и квадратного сечения. На участке c при истечении из канала квадратного сечения давление меньше, чем при истечении из канала круглого сечения, на 27%, как это было уже отмечено в работе [10]. При истечении из канала крестообразного сечения давление на преграде на этом участке в четыре раза больше, чем при истечении из канала круглого сечения.

Сравнение осциллограмм с теплерограммами показывает, что к моменту подъема давления при истечении из канала крестообразного сечения в структуре потока исчезает прямой скачок уплотнения, в отличие от случая истечения из каналов круглого и квадратного сечений (рис. 2).

Отношение полного давления на преграде к полному давлению на срезе канала характеризует потери полного давления на системе скачков уплотнения, возникающих при взаимодействии с преградой дифрагированной ударной волны и потока за ней. Полное давление потока на срезе канала определяется по числу Маха спутного потока за падающей ударной волной, которое является известной функцией от измеренного начального числа Маха ударной волны. В рассмотренном случае коэффициент восстановления полного давления оказался равным 0.09, 0.12 и 0.6 при истечении из каналов квадратного, круглого и крестообразного сечения соответственно.

Установленные закономерности указывают на возможность управления полным давлением в потоке при выходе ударной волны из канала путем изменения формы его поперечного сечения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 01-01-00664).

Список литературы

- [1] Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новгород: Наука, 1984.
- [2] Омельченко А.В., Усков В.Н. // Изв. РАН МЖГ. 1995. № 6. С. 118–126.
- [3] Малоземов В.Н., Омельченко А.В., Усков В.Н. // Прикладная математика и механика. 1998. Т. 62. В. 6. С. 1014–1020.
- [4] Голуб В.В., Набоко И.М., Куликовский А.А. // ЖПМТФ. 1976. № 1. С. 41–45.

- [5] *Teshima K.* // Proc. of the 1989 National Symposium on Shock Wave Phenomena. Tohoku University, Japan, 1989. P. 135–143.
- [6] *Баженова Т.В., Базаров С.Б., Голуб В.В.* // Изв. АН. МЖГ. 1993. № 1. С. 200–201.
- [7] *Баженова Т.В., Голуб В.В., Бормотова Т.А.* // МЖГ. 1999. № 3. С. 114–120.
- [8] *Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 10–15.
- [9] *Баженова Т.В., Голуб В.В., Бормотова Т.А.* // ТВТ. 2001. Т. 39. № 1. С. 124–127.
- [10] *Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В.* // ТВТ. 2002. Т. 40. № 2. С. 250–255.