

03;12

Уменьшение силы воздействия на преграду потока за слабой ударной волной, выходящей из канала

© Т.В. Баженова, В.В. Голуб, А.С. Чижиков

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

Поступило в Редакцию 14 февраля 2005 г.

Экспериментально продемонстрирована возможность уменьшения силы действия на преграду потока за ударными волнами, выходящими из канала, путем изменения формы сечения канала для слабых ударных волн, поток за которыми является дозвуковым. Результаты численного интегрирования экспериментальных осциллограмм давления показали, что замена круглого сечения на крестообразное приводит к уменьшению вдвое избыточной силы действия на преграду на квазистационарной стадии взаимодействия. Уменьшение силы действия потока на преграду вызвано диссипацией энергии в трехмерном потоке за счет интерференции волн разрежения и сжатия, возникающей при перераспределении масс газа между осями симметрии и потерями при образовании на краях вихрей, фиксируемых на теплерограммах.

Как показано в работе [1], минимизация потерь полного давления в струе может быть достигнута путем управления волновой структурой струи.

В ряде работ [2,3] проведены исследования управления воздействием на преграду при нестационарном взаимодействии с ударными волнами, выходящими из канала, посредством изменения его геометрии. Выполнены экспериментальные и численные исследования воздействия на преграду потока за ударной волной, выходящей из каналов круглого, квадратного и крестообразного поперечного сечения для сильных ударных волн, поток за которыми является сверхзвуковым. Показано, что при переходе к трехмерной геометрии канала (замене сечения канала с круглого на крестообразное) в структуре потока исчезает прямой скачок уплотнения (диск Маха) [4] и сила действия потока на преграду увеличивается на порядок [5].

В данной работе предпринято экспериментальное исследование воздействия на преграду потока за ударной волной, выходящей из канала крестообразного поперечного сечения для слабых ударных волн, поток за которыми является дозвуковым. Уменьшение действия слабой ударной волны представляет интерес для ряда прикладных задач, таких как меры безопасности при взрывах в шахтах, домах, при разрыве трубопроводов, емкостей под давлением, а также при разработке устройств для уменьшения акустического воздействия выхлопов двигателей внутреннего сгорания.

Экспериментальная установка состояла из ударной трубы, соединенной с цилиндрической вакуумной камерой. У торца ударной трубы с квадратным сечением 40×40 мм устанавливалась вставка с каналом круглого или крестообразного сечения, располагающимся внутри трубы. Диаметр круглого сечения составлял 20 мм, крестообразное сечение представляло собой две пересекающиеся щели длиной 37 мм и шириной 5 мм. Торец ударной трубы размещался 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 (20 мм), для крестообразного — диаметр круга, эквивалентного по площади ($d = 1.08d_0$).

На преграде в центральной точке потока были установлены датчики давления „Kistler-603B“. Датчики на преграде, расположенные вдоль двух лучей под углом 45° с шагом по радиусу, позволяли регистрировать распределение давления на преграде в потоках, имеющих две оси симметрии при дифракции ударной волны из канала крестообразной формой поперечного сечения.

Визуализация картины течения производилась с помощью теневого прибора ИАБ-451 и оптомеханической высокоскоростной камеры ВСК-5. Проведено сравнение осциллограмм давления и теплогограмм при различных формах сечения канала для двух расстояний до преграды

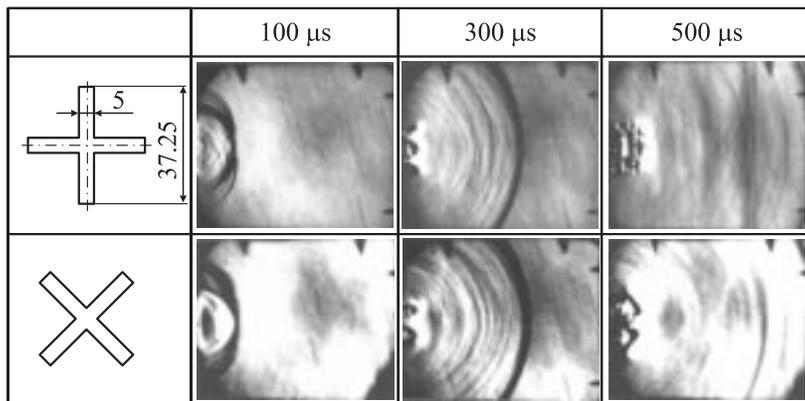


Рис. 1. Структура потока, формирующаяся при выходе ударной волны из канала крестообразной формы на нестационарной стадии процесса при числе Маха ударной волны $M_0 = 1.17$. Расстояние между реперными точками — 100 mm.

$L = 1d$ и $2d$. Сравнение проводилось в 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.

Поток за ударной волной в воздухе становится дозвуковым при числе Маха ударной волны, равном 2.2. Однако при выходе ударной волны из канала волна разрежения, образующаяся на выпуклом угле, движется вверх по потоку вдоль стенки, поток ускоряется. Наименьшее число Маха ударной волны, при котором возникает сверхзвуковой поток, равно 1.35 [6,7]. Опыты по исследованию влияния формы сечения канала на действие ударной волны на преграду проведены нами при числе Маха падающей ударной волны 1.17 (расчетное число Маха потока за ударной волной в канале составляло 0.25).

Теплограммы показывают (рис. 1), что при истечении из канала крестообразной формы на нестационарной стадии процесса при начальном числе Маха ударной волны $M_0 = 1.17$ в структуре потока отсутствуют скачки уплотнения, характерные для сверхзвукового потока. В начальный момент фронт ударной волны имеет плоский участок напротив выхода из канала. В последующем форма фронта приближается

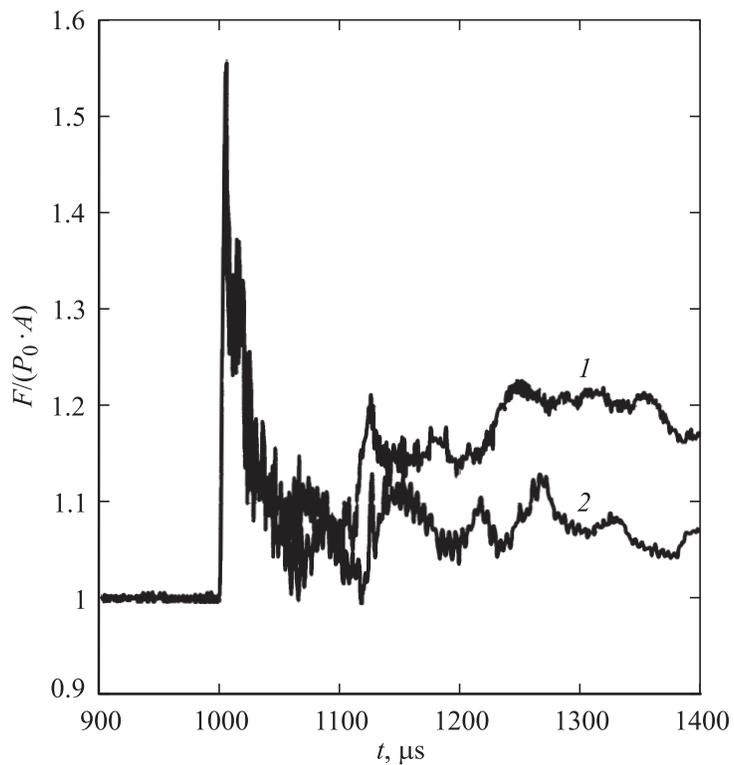


Рис. 2. Изменение силы давления газа на преграде при выходе ударной волны из каналов с круглым (1) и крестообразным (2) сечением при числе Маха ударной волны $M_0 = 1.17$. Расстояние до преграды $L = 2d$.

к сферической, от фронта по потоку распространяются звуковые волны. У кромок выходного отверстия формируются вихри, которые могут быть причиной потерь полного давления. Структура потока различается при просвечивании в направлении вдоль образующей крестовины и под углом к ней.

Регистрация изменения давления на преграде несколькими датчиками, как функции радиуса, позволяет получить интегральную характеристику распределения давления. Граничными условиями здесь будут:

условие симметрии при $R = 0$ и условие конечности возмущения при $R \rightarrow \infty$. Таким образом, выполнив интерполяцию, для каждого момента времени можно выполнить интегрирование по радиусу

$$F(t) = \int_0^{R2 \cdot \pi} \int_0^{\pi} P^*(r, t) \cdot d\varphi \cdot dr, \quad (\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2.$$

Для случая осесимметричного потока, из условия осевой симметрии, вычисление интеграла легко сводится к одномерному. При графическом анализе осциллограмм переходим к безразмерному значению, нормируя на начальное давление P_0 и площадь интегрирования A (площадь интегрирования представляет собой круг с радиусом R).

В качестве площади интегрирования выбрана площадь круга с радиусом $0.5d$ — область ядра потока. Поле давлений для каждого момента времени получено путем аппроксимирования значений давления по радиусу и интерполирования по углу. Результаты численного интегрирования экспериментальных осциллограмм давления, показывающие изменение силы давления газа на преграде, приведены на рис. 2 (для $L = 1d$). Замена круглого сечения на крестообразное приводит к уменьшению избыточной силы действия на преграду на квазистационарной стадии взаимодействия вдвое.

Проведенные ранее исследования показали, что при замене сечения канала с круглого на крестообразное при сверхзвуковом потоке за ударной волной сила действия потока на преграду увеличивается, так как уменьшаются потери полного давления на прямом скачке уплотнения. При дозвуковом потоке за ударной волной потери на прямом скачке отсутствуют. Наблюдаемое в данной работе уменьшение силы действия потока на преграду вызвано диссипацией энергии в трехмерном потоке за счет интерференции волн разрежения и сжатия, возникающей при перераспределении масс газа между осями симметрии и потерями при образовании вихрей на кромках [8].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 04–01–00305).

Список литературы

- [1] Малоземов В.Н., Омельченко А.В., Усков В.Н. // Прикладная математика и механика. 1998. Т. 62. В. 6. С. 1014–1020.
- [2] Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 10–15.
- [3] Баженова Т.В., Голуб В.В., Бормотова Т.А. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 2. С. 250–255.
- [4] Баженова Т.В., Голуб В.В., Котельников А.Л. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 9. С. 69–74.
- [5] Баженова Т.В., Голуб В.В., Котельников А.Л. // ТВТ. 2004. № 6. С. 900–907.
- [6] Kleine H., Ritzerfeld E., Gronig H. // Proc. of the 19-th Int. Symp. on Shock waves. Marseille, France, 26–30 July 1993. P. 117–122.
- [7] Abe A., Takayama K. // Proc. of National Symp. on shock wave phenomena. Japan, 1988. P. 41–56.
- [8] Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 16. С. 52–58.