

03;12

## **Воздействие на преграду ударных волн, выходящих из частично перекрытого канала**

© Т.В. Баженова, Т.А. Бормотова, В.В. Голуб,  
С.А. Новиков, С.Б. Щербак

Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Москва

Поступило в Редакцию 18 января 2000 г.

Исследовано влияние частичного перекрытия канала на относительную роль двух процессов: действия ударной волны и действия струйного течения спутного потока. Установлено, что влияние частичного перекрытия канала приводит к уменьшению или увеличению динамического воздействия ударных волн на преграду в зависимости от времени воздействия и числа Маха ударной волны.

Воздействие на преграду ударных волн, выходящих из частично перекрытого канала, представляет собой комплексную газодинамическую задачу. При больших числах Маха ударной волны взаимодействие с преградой определяется действием ударной волны, при малых числах Маха — действием струйного течения спутного потока. В промежуточном случае сочетается действие этих двух процессов. В работе исследовано влияние частичного перекрытия канала на относительную роль двух процессов. В случае, когда канал частично закрыт, воздействие дифрагированной ударной волны на предметы может быть выше, так как начальный перепад давлений на волне выше — промежуточный между падающей и отраженной волной.

Экспериментальное исследование воздействия на преграду слабой ударной волны, дифрагированной из открытого канала круглого сечения, было выполнено в работе [1]. Численный расчет ранней стадии этого процесса был сделан в [2]. Полученное поле изобар дало совпадающие с экспериментом конфигурации падающей и отраженной волн. Взаимодействие слабой дифрагированной ударной волны с преградой исследовалось с целью установления оптимальной формы глушителя автомобиля [3,4]. В работе [5] показано, что при дифракции ударной волны из осесимметричного канала затухание происходит медленнее,

если на выходе трубы устанавливается коаксиальная цилиндрическая вставка. Авторы работы [5] рекомендуют такую геометрию выхода для усиления воздействия ударной волны на обрабатываемые поверхности. Влияние частичного перекрытия торца канала на действие ударной волны на преграду до настоящего времени не исследовано.

Эксперименты проводились на ударной трубе сечением  $40 \times 40$  см, соединенной с цилиндрической вакуумной камерой диаметром 80 см и длиной 120 см. На торце ударной трубы устанавливался фланец с каналом круглого сечения с диаметром  $d = 20$  мм и длиной 100 мм, располагающийся внутри трубы. Торцы трубы мог экранироваться диафрагмой с отверстием диаметром  $0.5d$ . Торцы ударной трубы с фланцем, поверхность которого образует со стенкой ударной трубы угол  $90^\circ$ , размещается в поле зрения плоскопараллельных оптических окон барокамеры. Напротив торца ударной трубы была установлена на различных расстояниях плоская преграда. Для визуализации картины течения использовались теневой прибор ИАБ-451 и модернизированная высокоскоростная камера ВСК-5.

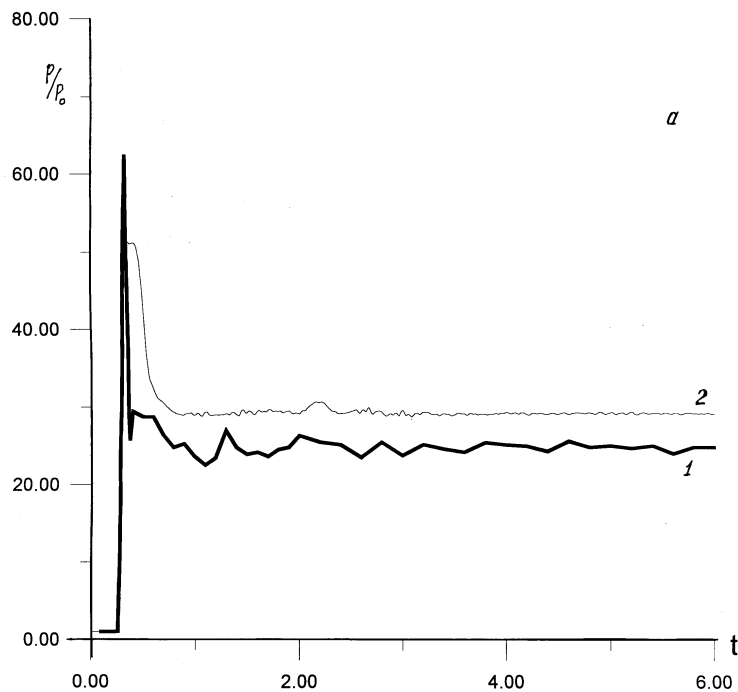
Численное моделирование задачи о неавтономной дифракции проводилось путем решения уравнений Эйлера методом Годунова второго порядка точности. Разностная схема основывается на интегральной форме законов сохранения и строится по методу конечных объемов. Использовались монотонные схемы первого порядка точности по пространственным переменным Годунова, Стегера–Уорминга, построенные на их основе схемы второго порядка и близкие к ним по идеологии построения схемы Чакраварти и Хартена. Схемы второго порядка используют идеи уменьшения полной вариации решения (Total Variation Diminishing — TVD). Граничные условия выбирались в соответствии с геометрией с учетом частичного перекрытия канала и установления преграды на определенном расстоянии от торца трубы. Вычисляется поле параметров потока для заданного числа Маха падающей ударной волны с учетом частичного отражения ударной волны от диафрагмы. Результаты расчета представлялись в безразмерных координатах относительно параметров невозмущенного газа в барокамере: плотности  $\rho_0$  и давления  $p_0$ . Расстояния отнесены к диаметру трубы  $d$ . Безразмерное время  $t$  связано с размерным  $\tau$  соотношением:  $t = \frac{\tau}{d} \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}}$ .

Получены теплогограммы дифракции ударной волны с числами Маха  $1.15 < M_0 < 5$  и ее взаимодействия с преградой. Эксперимен-

тально полученная зависимость координаты фронта дифрагированной волны по направлению оси симметрии сравнивалась с численным расчетом. За координату фронта ударной волны в расчете принималась координата с наибольшим градиентом плотности, поскольку именно она регистрируется на экспериментальных теплерограммах. Результаты численного расчета удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. Изменение во времени давления на преграде, полученное из численного расчета, сравнивалось для случаев выхода ударной волны из открытого и частично перекрытого каналов для ударных волн с числами Маха  $M_0 = 1.15$  (слабая ударная волна, поток за которой дозвуковой) и  $M_0 = 3$  (сильная ударная волна, поток за которой сверхзвуковой). Расстояние между выходом из канала и плоской преградой варьировалось от  $0.2$  до  $1.5d$ .

На рис. 1 показано изменение давления в центральной точке преграды, установленной на расстоянии  $0.5d$  при выходе ударной волны из канала, перекрытого диафрагмой с отверстием с диаметром  $0.5d$ , и из открытого канала при  $M_0 = 3$  и  $M_0 = 1.15$ . При  $M_0 = 3$  (рис. 1, *a*) воздействие дифрагированной волны вызывает в первый момент скачок давления, затем следует быстрое падение, как при отражении сферической ударной волны. Когда к пластине подходит граница раздела потока, истекающего из канала, и потока ранее невозмущенного газа за дифрагированной волной, то наблюдается второй подъем давления. Затем в центральной части пластины устанавливается квазистационарное состояние. Видно, что вторичный рост давления незначителен по сравнению с давлением в момент отражения ударной волны. При установке диафрагмы давление на преграде становится меньше, но характер изменения давления остается таким же, как при открытом торце. Этот результат находится в соответствии с данными работы [6], где было отмечено, что установление отражающего сопла в торце канала способствует понижению давления на преграде.

При взаимодействии с преградой слабой ударной волны (рис. 1, *b*) установление диафрагмы способствует увеличению амплитуды и продолжительности воздействия на преграду. В отличие от дифракции из открытого канала давление на преграде возрастает в основном не при отражении дифрагированной волны, а на более поздних стадиях при торможении спутного потока. Аналогичный ход изменения давления на преграде наблюдается и на других расстояниях до преграды.



**Рис. 1.** Изменение давления на преграде, установленной на расстоянии  $0.5d$  при выходе ударной волны из канала, перекрытого диафрагмой с отверстием с диаметром  $0.5d$  (1), и из открытого канала (2).  $M_0 = 3(a)$  и  $1.15(b)$ .

Для сравнения действия ударной волны, выходящей из частично закрытого и открытого торца канала, были вычислены отношения импульсов давления в этих двух случаях в различные моменты времени (рис. 2). При всех исследованных расстояниях до преграды (от  $0.2$  до  $1.5d$ ) отношения импульсов зависят от времени подобным образом. На первой стадии процесса взаимодействия с преградой импульс давления ударной волны, выходящей из частично закрытого торца канала, на  $15-20\%$  меньше, чем при выходе из открытого торца. Затем наблюдается превышение импульса ударной волны при выходе из частично закрытого торца над импульсом при выходе из открытого торца. После достижения квазистационарной стадии импульс давления на преграде при выходе из

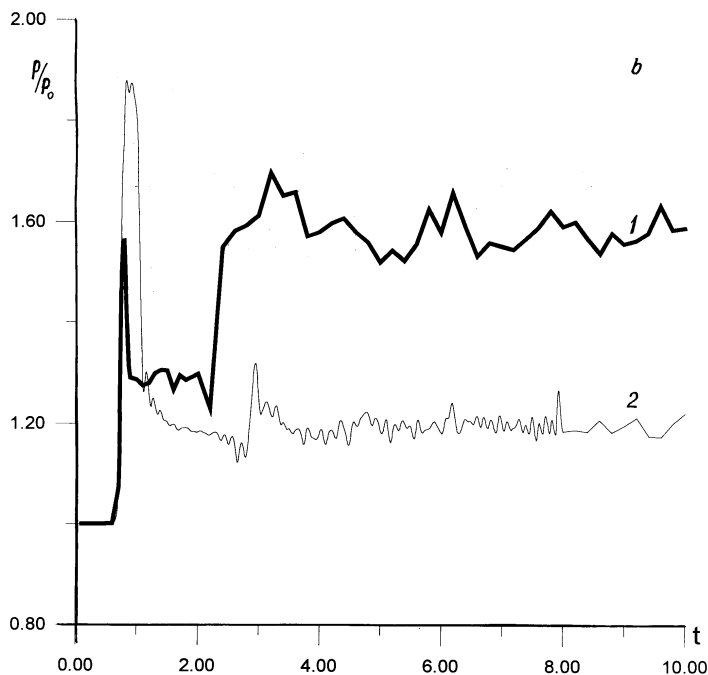
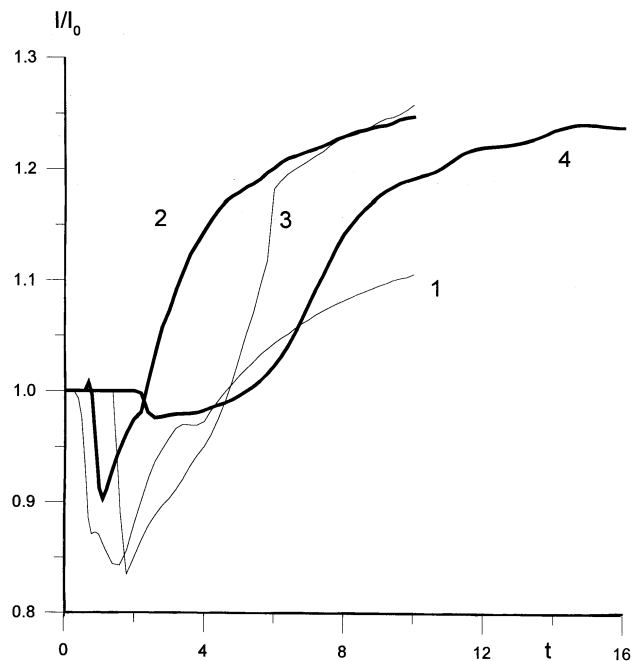


Рис. 1 (продолжение).

частично закрытого торца канала на 25% превышает значения импульса при выходе из открытого торца.

Эксперименты и расчеты показали, что влияние частичного перекрытия канала приводит к уменьшению или увеличению динамического воздействия ударных волн на преграду в зависимости от времени воздействия и числа Маха ударной волны. При малых числах Маха на первом этапе превалирует действие ударной волны, а на втором этапе — действие струйного течения спутного потока. У торца трубы ударная волна частично отражается от диафрагмы с отверстием диаметром  $d/2$ , центральная часть ее начинает дифрагировать в открытое полупространство. Расстояние до преграды, равное одному диаметру канала, эквивалентно двум диаметрам отверстия в диафрагме. Затухание интенсивности дифрагированной ударной волны калибруется



**Рис. 2.** Отношения импульсов давления на преграде при выходе ударной волны из канала, перекрытого диафрагмой с отверстием с диаметром  $0.5d$ , и из открытого канала.  $M_0 = 1.15$ , 1–4 — расстояния до преграды от выхода из канала  $0.2d$ ,  $0.5d$ ,  $1.0d$ ,  $1.5d$  соответственно.

диаметрами отверстия. Поэтому на первом этапе интенсивность ударной волны, выходящей из канала с диафрагмой, меньше, чем при выходе из открытого канала на том же расстоянии. В дальнейшем та часть ударной волны, которая отразилась, начинает существенно менять параметры за ударной волной. Возмущение со скоростью звука сносится к оси симметрии, а затем со скоростью потока сносится в направлении распространения первичной ударной волны. Это приводит к увеличению давления на плоской преграде, установленной напротив выхода из канала. Результирующий импульс давления на преграде при выходе слабой ударной волны из частично закрытого торца канала превышает значения импульса при выходе из открытого торца.

Обнаруженное явление открывает возможность управления импульсом давления на преграде путем изменения геометрии выхода из канала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## Список литературы

- [1] *Панов Б.Ю., Старшинов А.И., Узрюмов Е.А.* // Газодинамика и теплообмен. Л., 1970. В. 1. С. 108–115.
- [2] *Серова В.Д.* // Газодинамика и теплообмен. Л., 1981. В. 6. С. 121–130.
- [3] *Phan K., Stollery J.* // Proc. 14th Int. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves. Sydney, 1983. P. 519–525.
- [4] *Matsumura S., Onodera O., Takayama K.* // Shock Waves @ Marseille III. Springer Verlag, Berlin. 1995. P. 367–372.
- [5] *Yu Q., Gronig H.* // Shock Waves. 1996. V. 6. N 5. P. 249–258.
- [6] *Баженова Т.В., Голуб В.В., Бормотова Т.А., Шульмейстер А.М., Базаров С.В.* // МЖГ. 1999. № 4. С. 110–115.