

УДК 533.6.011.72

© 1999 г. Т.В. БАЖЕНОВА, С.Б. БАЗАРОВ, Т.А. БОРМОТОВА,  
В.В. ГОЛУБ, А.М. ШУЛЬМЕЙСТЕР

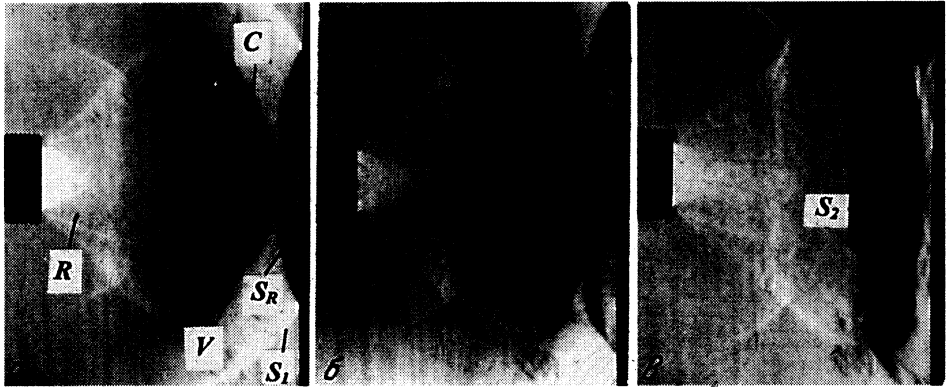
### ВОЗДЕЙСТВИЕ ДИФРАГИРОВАННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПРЕГРАДУ

Представлены результаты экспериментального и численного исследования взаимодействия сильной ударной волны, выходящей из осесимметричного канала, с пластиной, расположенной перпендикулярно оси канала. Полученные в работе серии шлирен-фотографий процесса и сравнение их с численным расчетом позволили определить поле параметров потока на различных стадиях взаимодействия. Приводится сравнение воздействия на пластину ударной волны, дифрагированной из открытого конца канала, с воздействием импульсной струи, выходящей из отражающего звукового сопла в торце канала.

Воздействие на преграду ударной волны, выходящей из канала, зависит от устройства выходной части канала. Если ударная волна двигается по каналу и отражается от закрытого конца, то увеличение параметров за отраженной волной по сравнению с падающей может привести к разрыву канала. Если торец канала совсем открыт, то ударная волна с параметрами падающей волны начинает дифрагировать в пространстве, воздействуя на окружающие предметы с определенной интенсивностью. Если канал частично закрыт, то воздействие дифрагированной ударной волны на преграду может быть выше, так как начальный перепад давлений на волне выше — промежуточный между падающей и отраженной волной. Если торец канала закрыт диафрагмой с соплом, критическое сечение которого мало по сравнению с сечением канала ("отражающее сопло"), то после отражения ударной волны от торца в окружающем пространстве возникает импульсная сверхзвуковая струя, перед которой распространяется пусковая ударная волна. Представляет интерес сравнение воздействия на преграду ударной волны, выходящей из открытого конца канала, с воздействием импульсной струи, выходящей из отражающего звукового сопла в торце канала.

Экспериментальное исследование воздействия ударной волны, дифрагированной из канала круглого сечения, на плоскую преграду было выполнено в [1]. Эксперименты проводились с достаточно слабыми ударными волнами, поток за которыми был дозвуковым ( $M_0 = 1,8$ ). Численный расчет ранней стадии этого процесса был сделан в [2]. Полученное поле изобар дало совпадающую с экспериментом конфигурацию падающей и отраженной волны. Косвенным образом сделан вывод о совпадении скорости отраженной волны со скоростью потока перед ней. В работе [3] экспериментально и численно исследовано взаимодействие отраженной от пластины ударной волны с вихрем, возникающим при дифракции слабой ударной волны из канала. Взаимодействие слабой дифрагированной ударной волны ( $M_0 = 1,46$ ) с преградой исследовалось в [4] с целью установления оптимальной формы глушителя.

При высоких числах Маха падающей ударной волны поток за скачком сверхзвуковой. При дифракции ударной волны из осесимметричного канала сначала наблюдается автомодельное течение, затем, после пересечения, центрированных волн разрежения, осуществляется нестационарная стадия течения и со временем форми-



Фиг. 1. Теневые фотографии последовательных стадий взаимодействия с пластиной ( $L = 50$  мм) ударной волны ( $M_0 = 3,2$ ), дифрагированной из канала круглого сечения.  $S_1$  – фронт дифрагированной ударной волны,  $S_R$  – фронт отраженной ударной волны,  $C$  – контактная поверхность,  $S_2$  – фронт волны торможения,  $R$  – волна разрежения,  $V$  – вихревое кольцо

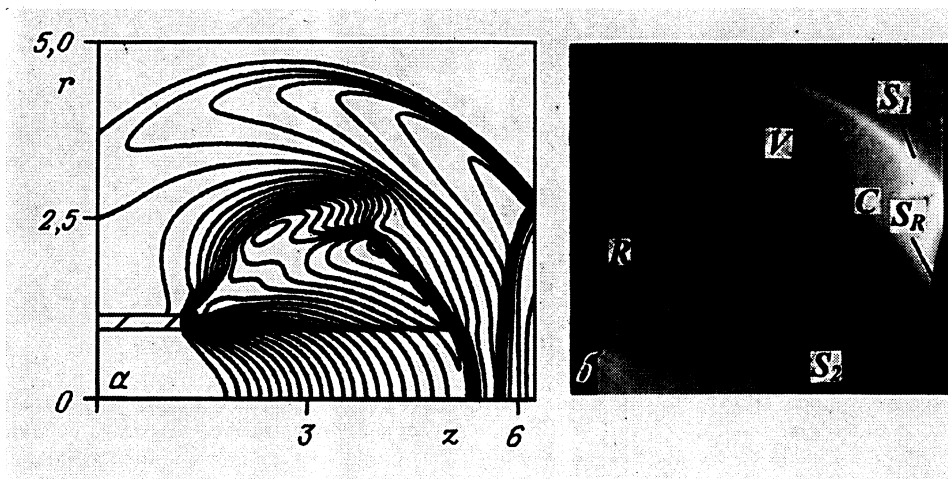
руется структура потока, подобная "бочке" в недорасширенной стационарной сверхзвуковой струе [5]. При дифракции ударной волны из осесимметричного канала затухание происходит медленнее, если на выходе трубы устанавливается коаксиальная цилиндрическая вставка [6]. Такая геометрия выхода рекомендуется для усиления воздействия ударной волны на обрабатываемые поверхности.

**1. Проведение экспериментов.** Экспериментальная установка для исследования трехмерной дифракции ударной волны представляла собой ударную трубу квадратного сечения  $40 \times 40$  мм с вакуумной камерой. В конце ударной трубы устанавливается канал круглого сечения диаметром  $d = 20$  мм. Канал входил внутрь трубы на 200 мм и выступал в барокамеру на расстояние 42 мм от задней стенки фланца. Барокамера объемом  $1 \text{ м}^3$  была снабжена окнами из оптического стекла размером  $160 \times 180$  мм. Напротив выходного отверстия ударной трубы устанавливалась плоская преграда, расстояние которой  $L$  варьировалось от 50 до 100 мм.

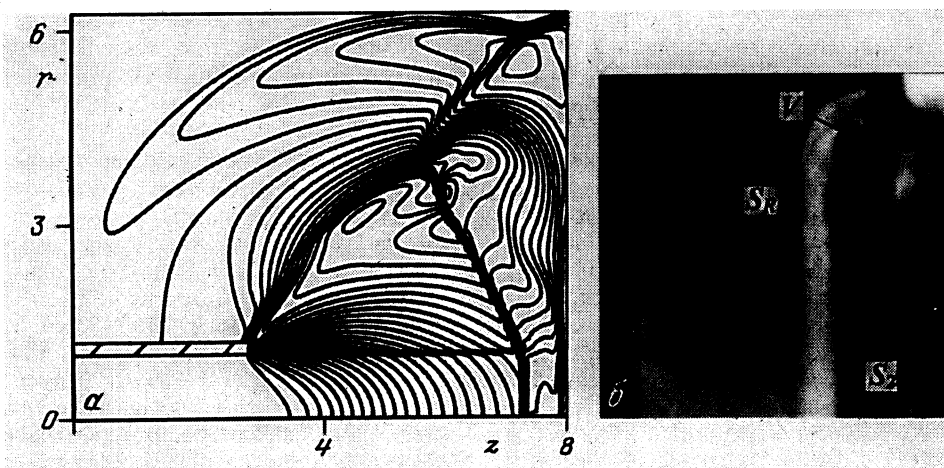
Течение визуализировалось с помощью теневого прибора ИАБ-451. Теневая картина фиксировалась на высокочувствительную пленку с размером кадра  $60 \times 60$  мм. Этот размер кадра обеспечивал возможность исследования деталей теневой картины. Включение источника света в нужный момент производилось с помощью блока синхронизации с регулируемой задержкой. Блок включался сигналом с пьезоэлектрического датчика давления, расположенного в стенке ударной трубы вблизи торца. Точность измерения времени составляла 1 мкс. Скорость падающей ударной волны измерялась базовым методом по сигналам двух датчиков давления с точностью 1–2%.

Число Маха падающей ударной волны изменялось в диапазоне  $M_0 = 3,2\text{--}4,7$ . Камера низкого давления и вакуумная камера наполнялись азотом в диапазоне  $p_0 = 4,0\text{--}50$  кПа. Давление воздуха или азота в камере высокого давления и глубина нарезки медных диафрагм подбирались таким образом, чтобы в ударной трубе возникла падающая ударная волна с заданным числом Маха  $M_0$ . В каждом эксперименте получался единственный снимок процесса дифракции с выдержкой 1 мкс в заданный момент времени от начала процесса. Путем повторения экспериментов с постоянным числом Маха ударной волны были получены серии фотографий с интервалом 5–10 мкс. Разброс режимов по числам Маха составлял 5%.

**2. Результаты экспериментов и сравнение с расчетом.** На фиг. 1 приведена серия теплерограмм процесса взаимодействия дифрагированной ударной волны с пластиной, расположенной на расстоянии 50 мм от торца трубы. Начальные кадры получены вскоре после прихода дифрагированной волны к пластине. Видны все основные элементы структуры, исследованные в автомоделном случае в [7]: фронт дифрагированной ударной волны  $S_1$ , контактная поверхность  $C$ , фронт волны торможения  $S_2$ ,



Фиг. 2. Расчетные линии равных плотностей (а) и шлирен-фотография (б) взаимодействия с пластиной дифрагированной ударной волны ( $M_0 = 3,2, t = 1,08$ )

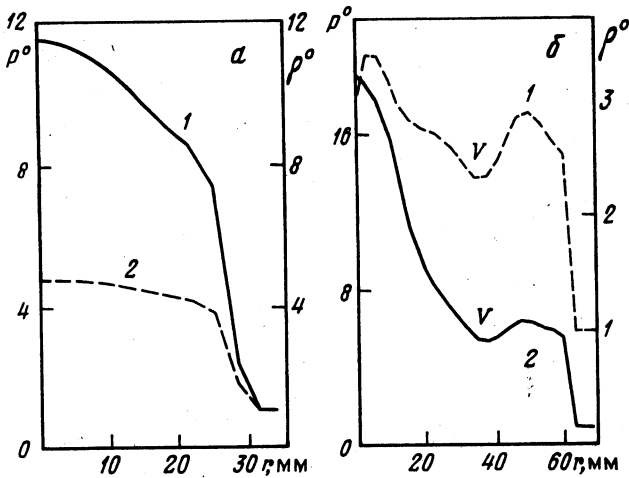


Фиг. 3. То же, что на фиг. 2, для  $M_0 = 4,7, t = 1,22$

волна разрежения  $R$ . На границе раздела  $C$  потока, истекающего из канала, и потока ранее невозмущенного газа за дифрагированной волной формируется вихревое кольцо  $V$ . Дифрагированная ударная волна  $S_1$  достигает преграды и отражается от нее. При этом формируется отраженная ударная волна  $S_R$ , движущаяся в сторону среза канала.

В центральной части пластины осуществляется регулярное отражение, на некотором расстоянии от центра возникает маховское отражение. Отраженная волна взаимодействует с контактной поверхностью и с волной торможения. С течением времени турбулентный вихрь  $V$  начинает взаимодействовать с  $S_R$ , проходит через нее и сталкивается с преградой. Размеры вихря увеличиваются со временем, центр вихря смещается к периферии от оси.

Численное моделирование взаимодействия импульсной струи с преградой проводилось методом Годунова первого порядка в рамках модели невязкого сжимаемого нетеплопроводного идеального газа. Решалась система уравнений движения в цилиндри-



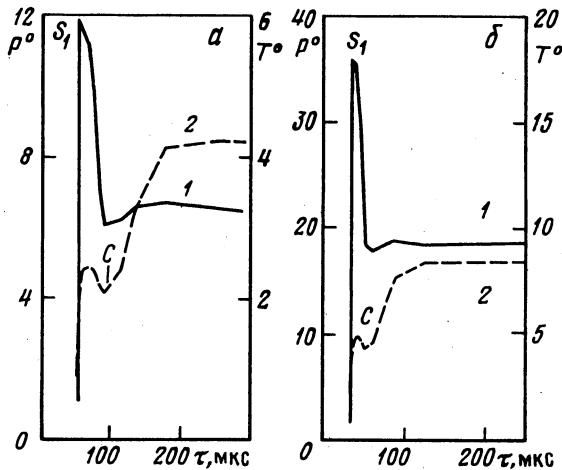
Фиг. 4. Расчетные распределения давления  $P^0 = p/p_0$  (1) и плотности  $\rho^0 = \rho/\rho_0$  (2) вдоль пластины после взаимодействия с ней дифрагированной ударной волны. а -  $M_0 = 3,2$ , б -  $M_0 = 4,7$

ческой системе координат в безразмерных параметрах. Начальные и граничные условия формировались в следующем виде: при  $t = 0$  параметры на срезе трубы равнялись параметрам за падающей ударной волной с числом Маха  $M_0$ , давление и плотность газа в камере  $p_0, \rho_0$ . На оси  $r = 0$  при  $t > 0$  ставятся условия симметрии, на твердых границах - условия непротекания.

На фиг. 2 приведено сравнение результатов численного расчета с экспериментальной теплерограммой процесса взаимодействия дифрагированной ударной волны с пластиной при  $M_0 = 3,2$ . Ось  $z$  направлена вдоль стенки канала, ось  $r$  - под углом  $90^\circ$  к ней. Выведены линии равной плотности в сечении, проходящем через ось симметрии потока. Полученные численные поля плотностей находятся в соответствии с экспериментальной теплерограммой. Видны невозмущенная часть дифрагированной волны  $S_1$ , контактная поверхность  $C$ , фронт волны торможения  $S_2$ , волна разрежения  $R$ , вихревое кольцо  $V$ , отраженная ударная волна  $S_R$ . Отраженная волна на этой стадии процесса взаимодействует только с контактной поверхностью. Форма отраженной волны более плоская, чем у падающей дифрагированной волны, как это отмечалось в работах [1, 2] для слабых волн.

На фиг. 3 приведены расчетные линии равных плотностей и теплерограмма взаимодействия дифрагированной ударной волны с пластиной при  $M_0 = 4,7$ . В этом случае наблюдается более поздняя стадия взаимодействия, так как дифрагирует ударная волна  $S_1$  с большей начальной скоростью. Отраженная волна  $S_R$  проходит через контактную поверхность, волну торможения  $S_2$  и вихрь  $V, S_R$  видна за вихрем. Вихрь движется к пластине и увеличивается в размере. Волна торможения после взаимодействия с отраженной волной приближается к пластине и занимает положение, соответствующее положению диска Маха в стационарной струе. Картина течения подобна той, которая возникает при взаимодействии с преградой недорасширенной сверхзвуковой струе.

Было вычислено распределение параметров потока у поверхности пластины после взаимодействия с нею дифрагированной ударной волны. На фиг. 4 приведены значения безразмерных плотности  $\rho/\rho_0$  и давления  $p/p_0$  в зависимости от радиуса при двух числах  $M_0$  в близкие безразмерные моменты времени на квазистационарном участке  $t = 1,08$  и  $1,22$  после выхода ударной волны из канала ( $t = (\tau/d)(p_0/\rho_0)^{0,5}$ , где  $\tau$  - время). Давление и плотность имеют максимальные значения в центре пластины.



Фиг. 5. Расчетная зависимость от времени относительного увеличения давления  $P^0 = p/p_0$  (1) и температуры  $T^0 = T/T_0$  (2) вблизи центра пластины при взаимодействии с ней дифрагированной ударной волны. а –  $M_0 = 3,2$ , б –  $M_0 = 4,7$

При  $M_0 = 3,2$  (фиг. 4, а) происходит плавное падение давления и плотности до места пересечения дифрагированной и отраженной волн. При  $M_0 = 4,7$  на более поздней стадии взаимодействия (фиг. 4, б) наблюдается провал плотности и давления в области расположения вихря.

Развитие процесса взаимодействия во времени удобно проследить по изменению параметров в центральной точке пластины. На фиг. 5 показано изменение температуры и давления в центральной точке пластины при двух исследованных режимах. Воздействие дифрагированной волны вызывает в первый момент скачок давления и температуры, затем следует быстрое падение, как при отражении сферической ударной волны. Когда в пластине подходит граница раздела  $C$  потока, истекающего из канала, и потока ранее невозмущенного газа за дифрагированной волной (контактная поверхность), то наблюдается второй подъем температуры и давления. Затем в центральной части пластины устанавливаются квазистационарные параметры. Видно, что вторичный рост давления незначителен по сравнению с давлением в момент отражения ударной волны, а температура в зоне торможения потока возрастает почти вдвое по сравнению с ростом температуры за отраженной волной. При  $M_0 = 4,7$  квазистационарная температура близка к температуре торможения потока за отраженной ударной волной в ударной трубе, при  $M_0 = 3,2$  она не достигает температуры торможения.

Сравним воздействие на преграду ударной волны, выходящей из открытого конца канала, с воздействием импульсной струи, выходящей из отражающего звукового сопла в торце канала, при одинаковых параметрах, т.е. при одинаковых начальных условиях в канале и при одинаковом числе Маха падающей ударной волны. Воспользуемся результатами экспериментального и численного исследования взаимодействия импульсной струи с преградой [8].

Струя формировалась после отражения ударной волны от торца ударной трубы со звуковым соплом. Диаметр сопла составлял меньше 1% диаметра трубы, что позволяло считать параметрами торможения струи параметры за отраженной ударной волной. Число Маха падающей ударной волны составляло 2,7. Через 100 мкс после отражения ударной волны от торца трубы на пластине, расположенной на расстоянии  $L = 40$  мм от среза сопла, устанавливалось квазистационарное состояние. Давление

превышало начальное давление в 3,5 раза (10% давления за отраженной ударной волной в ударной трубе), температура газа увеличивалась в 5 раз и превышала температуру за отраженной ударной волной в ударной трубе на 25%. Как показывает расчет, при тех же начальных условиях ( $M_0 = 2,7$ ,  $L = 40$  мм) после отражения от пластины ударной волны, дифрагированной из открытого конца трубы, через 100 мкс на пластине также устанавливается квазистационарное состояние. Давление превышает начальное давление в 6,5 раза, температура увеличивается в 2,5 раза.

Рассмотренный пример показывает, что установление отражающего сопла в торце канала способствует понижению давления и увеличению температуры на преграде.

**Заключение.** В центральной точке пластины воздействие дифрагированной волны вызывает в первый момент скачок давления и температуры, затем следует быстрое падение, как при отражении сферической ударной волны. Второй подъем температуры и давления наблюдается, когда к пластине подходит контактная поверхность. Затем в центральной части пластины устанавливаются квазистационарные параметры. Вторичный рост давления мал по сравнению с давлением в момент отражения ударной волны, а температура в зоне торможения потока возрастает почти вдвое по сравнению с ростом температуры за отраженной от преграды волной. Установление отражающего сопла в торце канала способствует понижению давления и увеличению температуры на преграде.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-02-16170а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов Б.Ю., Старишинов А.И., Узрюмов Е.А. Экспериментальное исследование воздействия нестационарной струи на плоскую преграду // Газодинамика и теплообмен. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. Вып. 1. С. 108–115.
2. Серова В.Д. О взаимодействии начальной стадии струи с плоской преградой // Газодинамика и теплообмен. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. Вып. 6. С. 121–130.
3. Minota T., Nishida M., Lee M.G. Shock formation by compressible vortex ring impinging on a wall // Fluid Dynam. Res. 1997. № 21. P. 139–157.
4. Phan K.C., Stollery J.L. The effect of suppressors and muzzle brakes on shock wave strength // Proc. 14th Intern. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves. Sydney: Shock Tube Symp. Publ., 1983. P. 519–525.
5. Баженова Т.В., Базаров С.В., Булат О.В., Голуб В.В., Шульмейстер А.М. Экспериментальное и численное исследование ослабления ударных волн при выходе из плоского и осесимметричного каналов // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 4. С. 204–207.
6. Yu Q., Gronig H. Shock waves from an open-ended shock tube with different shapes // Shock Waves. 1996. V. 6. № 5. P. 249–258.
7. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
8. Баженова Т.В., Базаров С.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В., Шульмейстер А.М. Взаимодействие импульсной сверхзвуковой струи с преградой // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 2. С. 45–51.

Москва

Поступила в редакцию  
3.II.1998