

УДК 533.6.011.72

© 1993 г. Т. В. БАЖЕНОВА, С. Б. БАЗАРОВ, О. В. БУЛАТ,
В. В. ГОЛУБ, А. М. ШУЛЬМЕЙСТЕР

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ ПЛОСКОГО И ОСЕСИММЕТРИЧНОГО КАНАЛОВ

Экспериментальными и расчетными методами исследована дифракция ударной волны ($M_0 = 4,7$) на угле, близком к 180° , на выходе из плоского и осесимметричного каналов. Получено поле течения и распределения давления за дифрагированной волной по направлению оси канала и на задней стенке при взаимодействии с ней дифрагированной волны.

Двухмерная дифракция на двугранном угле в широком диапазоне чисел Маха ($M_0 = 2-10$) изучалась численно и экспериментально [1]. Главной закономерностью процесса дифракции оказалось обнаружение автомодельности процесса дифракции для N_2 , CO_2 и воздуха в диапазоне углов $15-170^\circ$. Дифракция слабых ударных волн $1 < M_0 < 2$ на выходе ударной трубы (осесимметричный случай) экспериментально наблюдалась в [2, 3]. В [2] получены теневые фотографии процесса дифракции и выявлены основные элементы течения, а в [3] получена дополнительная информация в виде распределения плотности газа в подобном течении на основе расшифровки интерферограмм потока. Численное решение задачи о дифракции волны на выходе из ударной трубы [3, 4] показало хорошее согласие между расчетами и экспериментом.

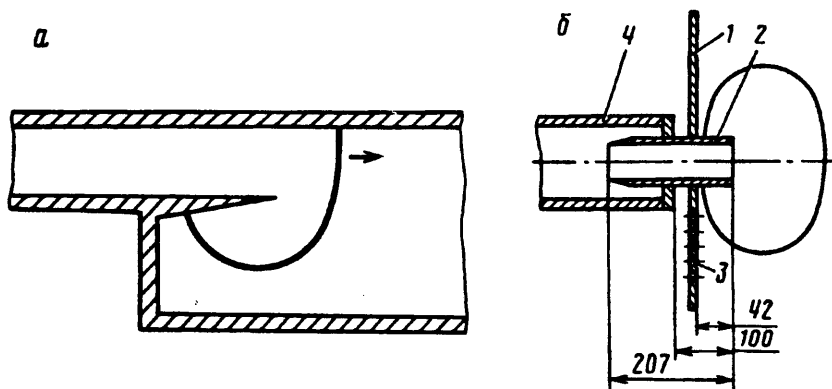
Цель данной работы — сравнение дифракции сильной ударной волны на выходе из плоского и осесимметричного каналов в свободное пространство с противодавлением.

Схема эксперимента для исследования дифракции ударной волны в плоском случае приведена на фиг. 1, а. В ударной трубе квадратного сечения $72 \times 72 \text{ мм}^2$ устанавливалась секция с расширяющейся в одну сторону камерой, боковые стенки которой были образованы плоскопараллельными стеклами. Вкладыши позволяли регулировать угол дифракции от 15 до 170° .

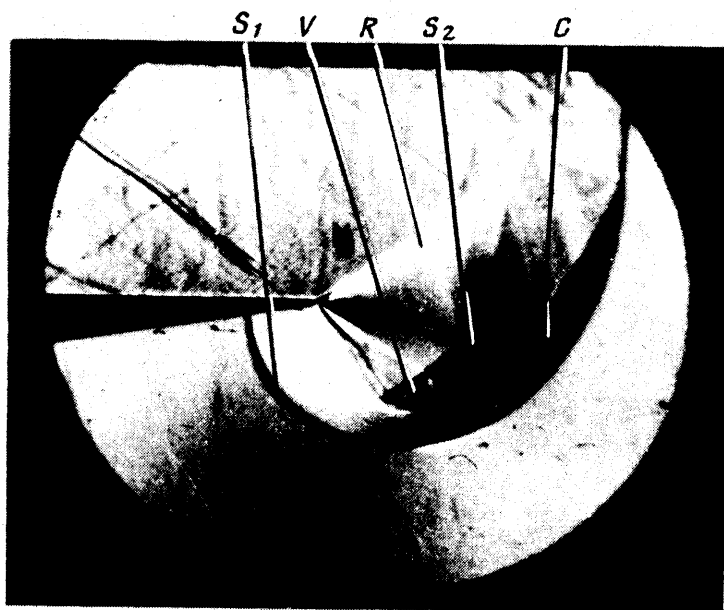
Экспериментальная установка для исследования осесимметричной дифракции ударной волны представляла собой ударную трубу 4, соединенную с вакуумной камерой (фиг. 1, б). В торце ударной трубы в барокамере устанавливался фланец с каналом круглого сечения 2, выступающий на расстояние 42 мм от помещенной в барокамере плоской стенки 1, в которой были установлены пять пьезодатчиков давления 3, расположенных вдоль прямой линии. Картина дифракции ударной волны регистрировалась теневым прибором ИАБ-451. Последовательные снимки позволяли проследить развитие процесса во времени. Число Маха ударной волны $M_0 = 4,7$. Камера низкого давления и барокамера наполнялись азотом до давления 30 мм рт. ст.

Численное моделирование явления дифракции проводилось при одном и том же числе Маха падающей ударной волны для случая плоского и осесимметричного насадка. Проводилось решение уравнений Эйлера для идеального газа с отношением удельных теплоемкостей $\gamma = 1,4$ методом Годунова.

Анализ фотографий дифракции ударных волн $M_0 = 4,7$ для плоского [1, 5] (фиг. 2) и осесимметричного (фиг. 3) случаев показывает общность картины течения. При дифракции падающей волны образуются ударная волна S_1 в окружающем пространстве, веер волны разрежения R , контактная поверхность C , отделяющая газ, приведенный в движение ударной волной, до дифракции от газа, приведенного в движение дифрагированной ударной волной, вторичная волна S_2 , обращенная вверх по потоку, в который газ, ускоренный в волне разрежения, тормозится до скорости, соответствующей уменьшенной скорости потока за дифрагированной волной. На больших углах дифракции возникает отрыв потока от стенки на вершине угла. Взаимодействие области повышенного давления за вторичной волной с областью пониженного давления вдоль линии отрыва приводит к образованию вихря V .



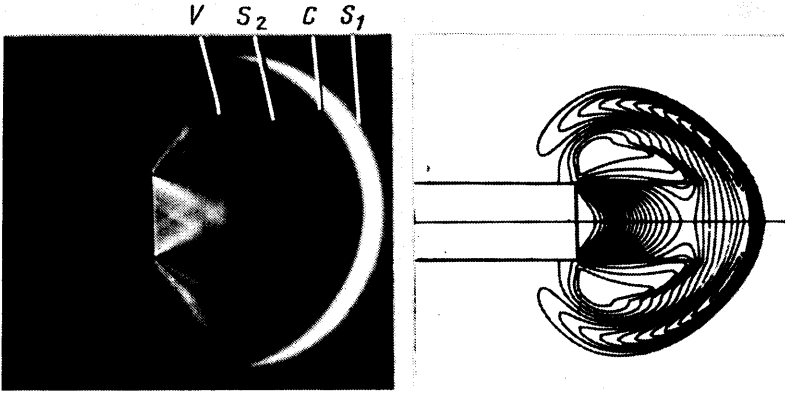
Фиг. 1



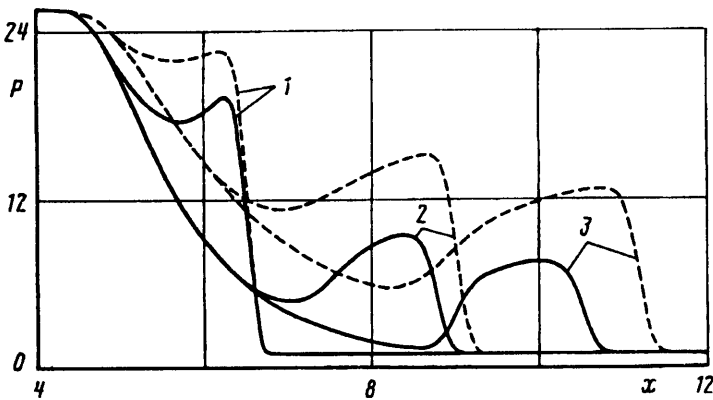
Фиг. 2

Численные расчеты поля параметров при дифракции для плоского случая показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. В [4] приведено сравнение расчетного расположения всех элементов течения и скорости их перемещения с экспериментальными данными из [1] для угла дифракции 90° . Показано совпадение с экспериментом формы дифрагированной волны, скорости вторичной волны, угла отрыва потока, скорости перемещения ядра вихря. Возникновение отрыва потока в решении уравнения Эйлера без учета вязкости объясняется, по-видимому, наличием схемной вязкости.

Дифрагированная ударная волна в обоих случаях имеет гладкую форму без возникновения тройных точек в пристеночной части. Форма волны в осесимметричном случае имеет более выпуклую форму и ее затухание происходит более быстро, чем в плоском случае. Сравнение экспериментальных данных для осесимметричного случая с изолиниями плотности, полученными в результате расчета (фиг. 3), показывает хорошее совпадение основных поверхностей и локализации вихревого ядра. На фиг. 4 показано распределение давления по оси потока, полученное из расчета. На графике совмещены профили давления для различных моментов времени от начала процесса дифракции: 13, 30, 47 мкс (кривые 1—3 соответственно). Безразмерная координата X означает расстояние от края



Фиг. 3

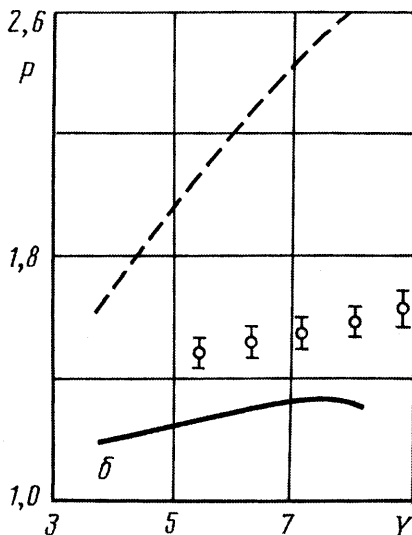
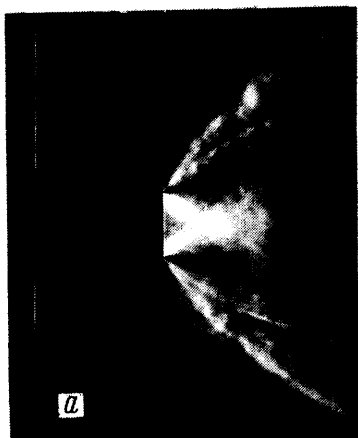


Фиг. 4

канала, отнесенное к радиусу трубы или высоте щели, безразмерное давление P отнесено к значению давления перед фронтом дифрагирующей ударной волны. Сплошные линии относятся к осесимметричному случаю, пунктир — к плоскому. Для каждого момента времени на графике виден подъем давления, начало которого приходится на ударную волну S_1 , а конец — на вторичную ударную волну S_2 , где течение согласуется с течением в волне разрежения. По мере удаления от края канала амплитуда давления на фронте дифрагированной волны уменьшается. В стационарном режиме остается только волна разрежения в истекающем газе. Из фиг. 4 видно, что амплитуда давления на дифрагированной волне и скорость волны быстрее падают в осесимметричном случае, чем в плоском.

На более поздних стадиях развития процесса дифрагированная волна достигала задней стенки (фиг. 5, а). Взаимодействие ударной волны со стенкой носило регулярный характер. Одновременно с этим вблизи среза сопла формировалось струйное течение, подобное по структуре начальному участку недорасширенной струи с характерной «бочкообразной» формой границы и «висячими» скачками. Смещение на границе струи, как показывают фотографии, служит источником слабых возмущений, которые регистрируются датчиками давления в виде регулярных пульсаций.

На фиг. 5, б приведены кривые зависимости интенсивности ударной волны от расстояния вдоль стенки для плоского и осесимметричного случая. Безразмерная координата Y — расстояние от оси симметрии канала, отнесенное к радиусу трубы или высоте щели, безразмерное давление P отнесено к значению давления перед фронтом дифрагирующей ударной волны. Сплошные линии — осесимметричный случай, пунктир — плоский. Точками нанесены экспериментальные значения, полученные для осесимметричного случая. Погрешность измерения давления составила 10%.



Фиг. 5

Сравнение показаний датчиков давления, установленных в задней стенке, с результатами выведенных значений давления из расчета в месте расположения датчиков показали общее качественное совпадение хода давления во времени. Абсолютные значения измеренных давлений в среднем на 15% выше расчетных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
2. Phan K. C., Stollery J. L. The effect of suppressors and muzzle brakes on shock wave strength//Proc. 14th Inter. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves, Sydney, 1983. Liverpool, 1983. P. 519—526.
3. Abe A., Takayama K. Shock wave discharged from the open end of a shock tube//Proc. Nat. Symp. on Shock Wave Phenomena, Japan, 1988. Sendai, 1989. P. 41—56.
4. Hillier R. Computation of shock wave diffraction at a ninety degree convex edge//Shock Waves. 1991. V. 1. № 2. P. 89—98.
5. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Т., Жилин Ю. В. Изменение интенсивности ударной волны при огибании выпуклого угла. ТВТ. 1976. № 2. С. 436.

Москва

Поступила в редакцию
17.III.1992.