

УДК 533.6.011.72

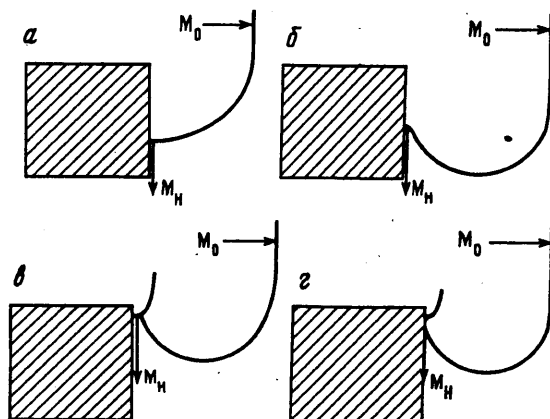
© 2000 г. Т.В. БАЖЕНОВА, Т.А. БОРМОТОВА, В.В. ГОЛУБ,
А.М. ШУЛЬМЕЙСТЕР, С.Б. ЩЕРБАК

ТИП ОТРАЖЕНИЯ ПРИСТЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ДИФРАКЦИИ ИЗ КАНАЛА КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Приведены результаты экспериментального и численного исследования дифракции ударных волн из канала квадратного сечения на выпуклом прямом угле при различных числах Маха падающей ударной волны M_0 ($1,4 < M_0 < 7$). Установлена зависимость типа отражения от стенки пристенной части дифрагированной волны и ее скорости от M_0 , от направления и времени.

При увеличении угла клина, вдоль которого распространяется ударная волна, происходит переход типа отражения от маховского к регулярному и давление на клине резко возрастает [1]. После выхода из канала ударная волна распространяется по поверхности у выходного отверстия (подобно выходу ударной волны из шахты или из окна здания при взрыве). Тип отражения дифрагированной волны от стенки зависит от того, под каким углом дифрагированная волна подходит к ней, и от числа Маха ударной волны около стенки. Эти параметры в свою очередь определяются углом между стенкой и направлением движения фронта ударной волны, а также числом Маха падающей ударной волны. При огибании ударной волной выпуклого угла происходит уменьшение скорости пристенной части ударной волны в связи с увеличением захватываемого ударной волной объема газа. Изменение скорости (а следовательно, и формы) происходит в той части ударной волны, которая взаимодействует с центрированной волной разрежения, исходящей из вершины угла, и с возвратным течением под линией срыва. В автотомельном случае скорость пристенной части волны не меняется со временем. Скорость пристенной части ударной волны определяет величину наибольшего давления на стенке.

В [2] приведена систематизация имеющихся экспериментальных данных [3–5] о зависимости типа отражения дифрагированной ударной волны от величины угла клина и от числа Маха падающей ударной волны M_0 для автотомельного случая (фиг. 1). Профиль дифрагированной ударной волны может быть разделен на два участка: часть ударной волны вблизи поверхности выпуклого угла и часть искривленного основного фронта волны, которая взаимодействует с веером волн разрежения, исходящим из вершины угла. Скорость пристенной волны зависит от характера течения газа под линией срыва. Она меньше скорости основной части волны. Пристенная волна сопрягается с основной ударной волной. Тип отражения называется нормальным, когда дифрагированная ударная волна скользит вдоль стенки и фронт волны расположен к ней под прямым углом (тип N, фиг. 1, а). При увеличении M_0 пристенная часть отстает от основной и на дифрагированной ударной волне возникает точка перегиба ("kink", тип K, фиг. 1, б). В этом случае имеет место разрыв второй производной в уравнении формы волны. При дальнейшем увеличении M_0 пристенная часть волны по-прежнему расположена нормально к стенке, но направление основной волны таково, что плавное сопряжение невозможно. Точка перегиба превращается в тройную точку и вблизи стенки возникает трехударная маховская конфигурация (тип M, фиг. 1, в) с отражен-



Фиг. 1. Схема типов отражения дифрагированной ударной волны от стенки: а – тип N, б – тип K, в – тип M, г – тип R

ной волной, исходящей из тройной точки. В этом случае имеет место разрыв первой и второй производных в уравнении формы волны. В области еще больших чисел M_0 угол траектории тройной точки уменьшается и возможно возникновение регулярного типа отражения (тип R, фиг. 1, г), при котором дифрагированная волна отражается под острым углом непосредственно от стенки. В плоском автомодельном случае переход от нормального типа отражения к отражению с изгибом при дифракции на угле 90° происходит при числе Маха $M_0 = 3$ и не меняется со временем. Угол между дифрагированной волной и стенкой (угол падения) близок к 90° . Угол падения ω_1 монотонно уменьшается от 90 до 65° при увеличении числа M_0 от 3 до $4,3$. При $M_0 = 4,3$ наблюдается изгиб на пристенной части волны. При $M_0 = 7,5$ ($\omega_1 = 55^\circ$) появляется трехударная конфигурация. При $7,5 < M_0 < 11$ угол падения уменьшается до 50° и наблюдается регулярное отражение с косым отраженным скачком на стенке.

Результаты численных расчетов [6] для плоского автомодельного случая также укладываются в предложенную схему систематизации. В трехмерном случае форма ударной волны меняется со временем и с направлением в пространстве [7]. При дифракции ударной волны с числом Маха $M_0 = 3,0$ из канала квадратного сечения тип отражения меняется во времени и пространстве и переходит от типа N к типу K. При сферическом взрыве вблизи плоской поверхности распределение безразмерного давления во времени и пространстве определяется типом отражения ударной волны от поверхности [8]. Тип отражения меняется по мере распространения взрывной волны по поверхности вследствие изменения угла падения и интенсивности волны.

1. Экспериментальная установка. Для исследования трехмерной дифракции ударных волн использовалась установка, состоящая из ударной трубы, соединенной с цилиндрической вакуумной камерой диаметром 80 см и длиной 120 см. На торце ударной трубы устанавливался фланец с каналом, располагающимся внутри трубы. Сечение ударной трубы составляло 40×40 мм, вставляемый канал имел длину 100 мм и имел квадратное сечение 20×20 мм. Обращенная к направлению движения ударной волны входная кромка канала имела по внешней стороне скос 10° . В результате внутрь канала входило только звуковое возмущение.

Время сохранения постоянных параметров на входе во вставленный канал складывается из времени прохождения падающей ударной волны до торца ударной трубы и времени прохождения отраженной ударной волны до входа в насадку. Для всех исследованных чисел Маха падающей ударной волны это время было больше 160 мкс, а время наблюдения за дифрагированными ударными волнами не превышало 150 мкс. Равенство чисел Маха ударных волн, измеренных в трубе и в насадке, подтверждается измерением скорости ударной волны по серии теневых фотографий в начальный момент дифракции.

Торец ударной трубы с фланцем, поверхность которого образовывала со стенкой ударной трубы угол 90° , размещался между плоскопараллельными оптическими окнами барокамеры. Путем поворота фланца относительно оси трубы достигалась возможность просвечивания потока за срезом трубы в различных направлениях. Визуализация картины течения производилась с помощью теневого прибора ИАБ-451.

Для исследования развития нестационарных газодинамических процессов используется высокоскоростная камера ВСК-5. Поскольку эта камера не предназначена для работы с прибором ИАБ-451, она была модернизирована путем замены штатных объективов, установки дополнительных объективов и переделкой электродинамического затвора. Это позволяет получить в одном эксперименте 72 кадра размером 16×22 мм с интервалом 4–7 мкс. В качестве дополнительной оптической системы, сопрягающей ВСК-5 со штатным объективом, были использованы объективы Таир-3С и Юпитер 37, располагающиеся последовательно от плоскости щели до объектива ВСК-5.

Для более подробного исследования деталей теневой картины с крупным размером кадра визуализация производилась с импульсным источником света длительностью 1 мкс. Теневая картина фиксировалась на высокочувствительную пленку с размером кадра 60×60 мм. 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.

Камера низкого давления ударной трубы и барокамера заполнялись воздухом. Давление воздуха в камере низкого давления, а также воздуха, азота или гелия в камере высокого давления и глубина нарезки медных диафрагм подбирались таким образом, чтобы в ударной трубе возникала падающая ударная волна с заданным числом Маха M_0 . Скорость падающей ударной волны измерялась базовым методом датчиками давления с точностью до 1%.

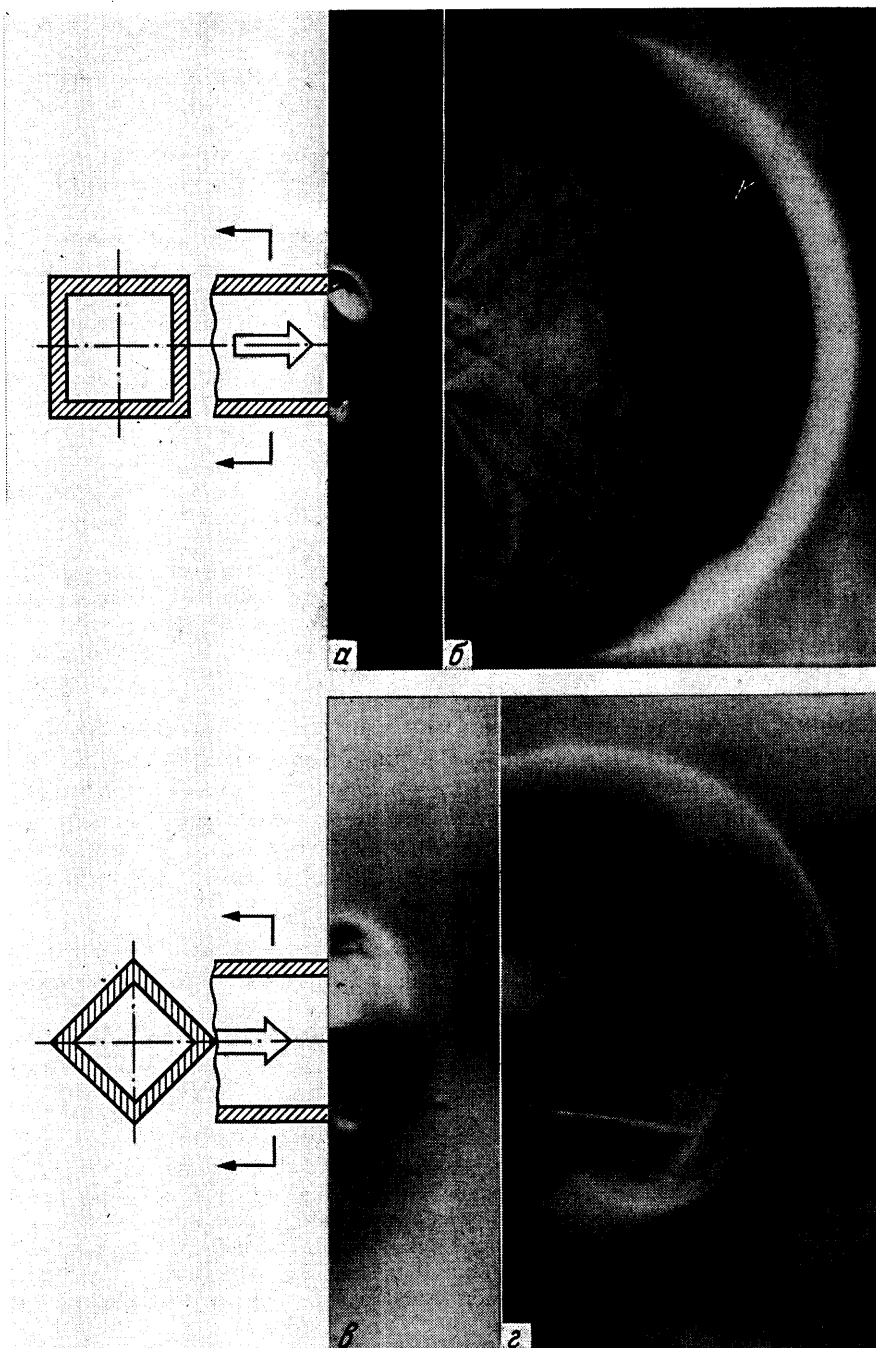
2. Численное моделирование. Численное моделирование задачи о неавтономной дифракции проводилось путем решения уравнений Эйлера методом Годунова второго порядка точности. На выходе из канала, установленного в торце ударной трубы, задавались параметры потока, вычисленные для заданного числа Маха падающей ударной волны. Проводился расчет поля течения для идеального газа в пространстве и во времени в зависимости от числа Маха падающей волны и показателя адиабаты истекающего газа.

Расчет трехмерной задачи проводился на сетке из прямоугольных ячеек общим числом $(60 \times 60 \times 60)$ и $(120 \times 120 \times 120)$. При увеличении числа расчетных ячеек в 8 раз расхождение значений параметров газа находилось в пределах 5%.

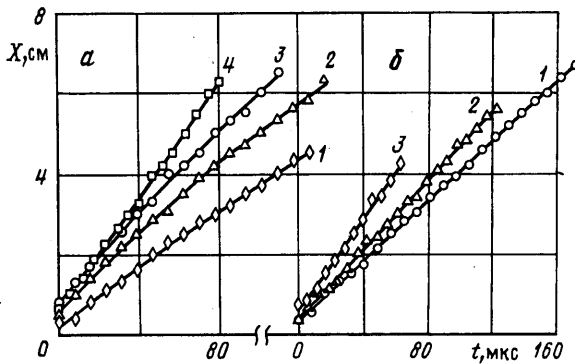
Результаты расчета представлялись в безразмерных координатах относительно параметров невозмущенного газа в барокамере: плотности ρ_0 и давления p_0 . Расстояния отнесены к диаметру трубы или стороне квадрата d . Безразмерное время τ связано с размерным t соотношением $\tau = (t/d)(p_0/\rho_0)^{0.5}$. Для сравнения результатов численного расчета с экспериментом строились траектории фронта по направлениям стороны и диагонали квадрата. Для этого из числового массива, соответствовавшего распределению параметров потока, в заданном сечении в заданный момент времени выбирались координаты фронта волны уплотнения на кривой давления, за которые принимались точки с наибольшим градиентом давления. Амплитуда давления в этой точке составляет 0,9 максимального значения. Результаты расчета траектории фронта дифрагированной волны вдоль стенки и в направлении оси канала совпадают с экспериментальными данными.

Форма фронта дифрагированной ударной волны в различных направлениях в плоскости, проходящей через ось трубы, определялась также по изображению численно полученного поля изобар. Однако траектории фронта не удалось определить из последовательности полей изобар из-за невозможности разрешить распределение давления внутри ударной волны. Скорость перемещения переднего фронта ударной волны, определенная по изображению численно полученного поля изобар, оказалось меньше экспериментально измеренной.

3. Результаты экспериментов. Были получены серии теневых фотографий развития процесса дифракции ударной волны из канала квадратного сечения на выпуклом пря-



Фиг. 2. Последовательные теньевые фотографии картины течения при дифракции ударной волны из канала квадратного сечения при просвечивании: *a, б* – по стороне квадрата, *в, г* – по диагонали квадрата: D_1 – дифрагированная ударная волна, K – контактная поверхность, R – веер волн разреза. Типы отражения: *a* – регулярное, *б* – маховское, *в* – нормальное, *г* – с изгибом



Фиг. 3. Зависимости от времени положения пристенной части дифрагированной ударной волны: *a* – по направлению стороны квадрата для $M_0 = 1,62; 1,95; 2,7; 4,65$ (данные 1–4); *б* – по направлению диагонали квадрата: $M_0 = 1,54; 3,05; 5,4$ (данные 1–3)

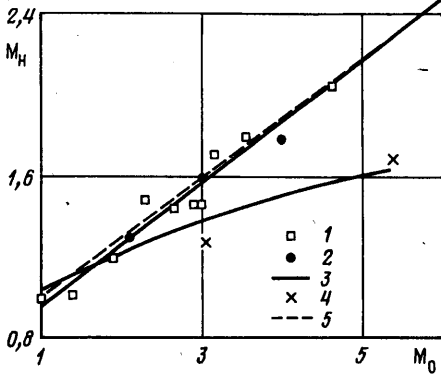
мом угле для различных чисел Маха ($M_0 = 1,4-7$) по направлениям стороны квадрата и его диагонали. На фиг. 2 приведены теневые фотографии картины течения при дифракции ударной волны. На фотографиях видны все основные элементы структуры, исследованные в автомодельном случае: дифрагированная ударная волна D_1 , контактная поверхность K , веер волн разрежения R . Проекция фронта дифрагированной ударной волны зависит от направления просвечивания и по-разному изменяется со временем. На приведенных фотографиях можно также проследить изменение типа отражения от нормального к маховскому.

На фиг. 3 представлены зависимости от времени положения пристенной части дифрагированной ударной волны по направлениям стороны и диагонали квадрата при различных M_0 . Аппроксимационные кривые для положения фронта ударной волны от начального числа Маха были получены методом наименьших квадратов. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от проведенных кривых составило 1%. Скорость волны определялась как производная от зависимости координаты фронта волны от времени. Среднее значение координаты фронта составило 3,5 см, а среднее значение времени – от 70 до 150 мкс в зависимости от начального числа Маха. Точность определения времени составляла ± 1 мкс, координаты ± 1 мм. Относительная ошибка в определении числа Маха дифрагированной ударной волны составляет 6%.

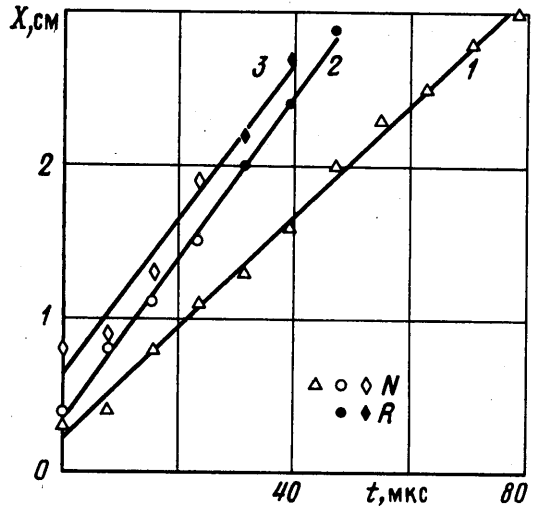
Траектории были аппроксимированы полиномами второй степени. В исследованном интервале времени (до 150 мкс) зависимость скорости фронта от времени по направлению стороны и диагонали квадрата очень слабая, поэтому для исследования зависимости числа Маха пристенной волны от M_0 воспользовались линейной аппроксимацией. На фиг. 4 дана зависимость числа Маха M_H пристенной части ударной волны по направлению стороны квадрата от M_0 и аналогичная прямая для плоского автомодельного случая [1], которая аппроксимируется соотношением $M_H = 1 + (1 - \sin \alpha_0/2)(M_0 - 1)$, где α_0 – угол клина. На основе полученных экспериментальных данных числа Маха пристенной части волны в зоне наблюдения (150 мкс) аппроксимируются соотношениями соответственно по направлениям стороны и диагонали: $M_H = 0,3M_0 + 0,7$; $M_H = 0,22M_0 - 0,01M_0^2 + 0,83$.

Первая зависимость близка к полученной для автомодельного случая [1]. В направлении оси канала z скорость ударной волны растет с числом M_0 и сильнее затухает со временем, например, при $M_0 = 3$ число Маха дифрагированной волны аппроксимируется соотношением

$$M_z = 2,92 - 1,08t \quad (t = 0, \quad z = d)$$



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Связь между числами Маха пристенной (M_H) и падающей (M_0) ударных волн. По направлению стороны квадрата: 1 – эксперимент, 2 – расчет; по направлению диагонали квадрата: 3 – эксперимент (аппроксимация), 4 – расчет, 5 – плоский автомодельный случай (эксперимент, [1])

Фиг. 5. Зависимости от времени положения пристенной части дифрагированной ударной волны по направлению стороны квадрата для $M_0 = 1,62; 2,6; 2,72$ (линии 1–3). Типы отражения: N – нормальный, R – регулярный

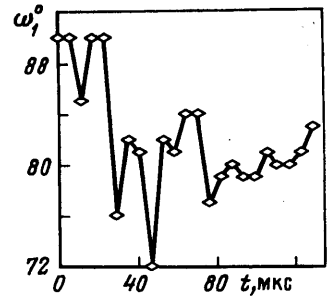
Приведенные аппроксимации экспериментальных данных в пределах точности измерений удовлетворительно описывают результат численного расчета скорости перемещения фронтов (фиг. 4).

4. Обсуждение результатов. Анализ серий тепловых картин дифракции позволяет установить закономерности перехода типа отражения дифрагированной волны от стенки при выходе ее из канала квадратного сечения. Форма дифрагированной ударной волны изменяется со временем, так как скорость распространения фронта в различных направлениях по-разному зависит от времени. Соответственно и угол подхода дифрагированной волны к стенке меняется во времени и пространстве, что сказывается на типе ее отражения.

В данной работе установлены границы перехода от нормального отражения дифрагированной ударной волны на прямом угле к отражению с изломом в диапазоне чисел Маха $1,4 < M_0 < 7$ в трехмерном случае. Для чисел Маха от $1,5 < M_0 < 2$ тип отражения по направлению стороны квадрата остается всегда нормальным. В диапазоне чисел Маха падающей волны от $2 < M_0 < 2,7$ тип отражения меняется в процессе распространения ударной волны от типа N к типу R и момент смены типа отражения с увеличением числа Маха наступает раньше (фиг. 5). При переходе типа отражения не наблюдается изменения скорости пристенной ударной волны. При M_0 свыше 2,7 вначале происходит нормальное отражение, которое переходит в отражение с изгибом типа K и в маховское отражение при $M_0 > 4,7$. При $M_0 = 7$ наблюдается маховское отражение с начального момента. Характер изменения типа отражения одинаков по направлению стороны и диагонали квадрата. Изменение во времени типа отражения, определяемое по цветному изображению численного поля изобар, согласуется с экспериментально наблюдаемым.

На границе перехода отражения к типу K ($M_0 = 3$) наблюдается неустойчивость перехода типа отражения, имеют место смены перехода от одного типа к другому

Фиг. 6. Угол ω_1 между дифрагированной ударной волной и стенкой при $M_0 = 3$ по направлению диагонали квадрата в различные моменты времени



и обратно. При этом угол ω_1 в направлении диагонали колеблется между 72 и 90° (фиг. 6), $M_H = 1,3$. Для плоской автомодельной задачи при таких углах ω_1 и $M_H < 2$ должно наблюдаться нормальное отражение. За время наблюдения состояние потока на выходе из канала не изменялось, точность измерения угла составляла $\pm 1^\circ$. Колебания угла падения пристенной части ударной волны не наблюдались при больших и меньших M_0 . Неустойчивость угла падения характеризует перестройку потока на границе перехода от одного типа отражения к другому.

Заключение. Эксперименты и расчеты показали, что при дифракции из канала квадратного сечения зависимость числа Маха пристенной волны по направлению стороны квадрата от числа Маха падающей волны M_0 близка к полученной для автомодельного случая. По направлению диагонали скорость ударной волны меньше и во всем исследованном диапазоне чисел M_0 возникает область сравнительно низкого давления. Зависимость типа отражения ударной волны при дифракции на прямом угле из канала квадратного сечения от числа M_0 отличается от результатов исследований автомодельной дифракции. Тип отражения при $1,4 < M_0 < 7$ меняется во времени и пространстве по закону, зависящему от числа Маха падающей волны.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
2. Matsuo K., Aoki T., Kashimura H. Diffraction of a shock wave around a convex corner // Proc. 17th Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes // Ed. J.M. Kim. N.Y.: Amer. Inst. Phys., 1990. P. 252–257.
3. Skews B.W. The shape of a diffracting shock wave // J. Fluid Mech. 1967. V. 29. Pt 2. P. 297–304.
4. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г., Комаров В.С., Сухов Б.Г. Исследование дифракции сильных ударных волн на выпуклых углах // Изв. АН СССР. МЖТ. 1973. № 4. С. 122–134.
5. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г., Жилин Ю.В. Изменение интенсивности ударной волны при огибании выпуклого угла // Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 14. № 2. С. 436.
6. Hillier R. Numerical modelling of shock wave diffraction // Shock Waves. Marseille IV. Berlin: Springer, 1995. P. 17–26.
7. Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В. и др. Дифракция ударной волны из канала квадратного сечения на выпуклом прямом угле // Изв. РАН. МЖТ. 1999. № 3. С. 114–120.
8. Brossard J., Desrosier C., Purnomo H., Renard J. Pressure loads on a plane surface submitted to an explosion // Shock Waves. Marseille IV. Berlin: Springer. 1995. P. 387–392.

Москва

Поступила в редакцию
15.V.1998