

3. Давыдова Н. А., Юшин А. Я. Экспериментальное исследование теплопередачи при обтекании плоских треугольных крыльев с притупленными кромками // Уч. зап. ЦАГИ. 1970. Т. 1. № 6. С. 117–125.
4. Колина Н. П. Ламинарный пограничный слой на затупленных осесимметричных телах различной формы // Тр. ЦАГИ. 1968. Вып. 1106. С. 268–328.
5. Смыгина Г. В., Юшин А. Я. Экспериментальное исследование в ударной трубе при $M_\infty = 13,6$ теплопередачи к моделям треугольных крыльев, составленных из двух эллиптических полуконов с разными значениями коэффициента эллиптичности // Тр. ЦАГИ. 1968. Вып. 1106. С. 44–67.
6. Башкин В. А. Ламинарный пограничный слой на бесконечно длинных эллиптических цилиндрах при произвольном угле скольжения // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 5. С. 76–82.
7. Ардашева М. М., Ильина С. А., Лодыгин Н. А. и др. Применение плавящихся термоминдикаторов для измерения тепловых потоков к моделям в аэродинамических трубах // Уч. зап. ЦАГИ. 1972. Т. 3. № 1. С. 77–82.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 599 с.
9. Бражко В. Н. Способ визуализации линий тока на поверхности моделей в аэродинамических трубах // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1749. С. 241–256.
10. Боровой В. Я., Иванов В. В., Орлов А. А., Харченко В. Н. Визуализация пространственного обтекания моделей с помощью лазерного ножа // Уч. зап. ЦАГИ. 1973. Т. 4. № 5. С. 42–49.
11. Fay J. A., Riddell F. R. Theory of stagnation point heat transfer in dissociated air // J. Aeronaut. Sci. 1958. V. 25. № 2. P. 73–85.

Москва

Поступила в редакцию
22.V.1989

УДК 533.6.011.72

© 1990 г.

Э. М. БАРХУДАРОВ, М. О. МДИВНИШВИЛИ, И. В. СОКОЛОВ,
М. И. ТАКТАКИШВИЛИ, В. Е. ТЕРЕХИН

НЕРЕГУЛЯРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ОСИ СИММЕТРИИ

Схождение одномерных сферической или цилиндрической ударных волн сопровождается неограниченным ростом параметров течения при приближении ударной волны к центру (оси) симметрии (неограниченная кумуляция) [1, 2]. Явление кумуляции присуще и неодномерным сходящимся осесимметричным ударным волнам. Экспериментально было показано, что кольцевая ударная волна усиливается при движении к оси [3]. Теоретический анализ этой задачи в рамках метода Уизема указывает на неограниченный характер кумуляции кольцевой ударной волны [4] при отсутствии низших азимутальных гармоник возмущения формы ударного фронта [5].

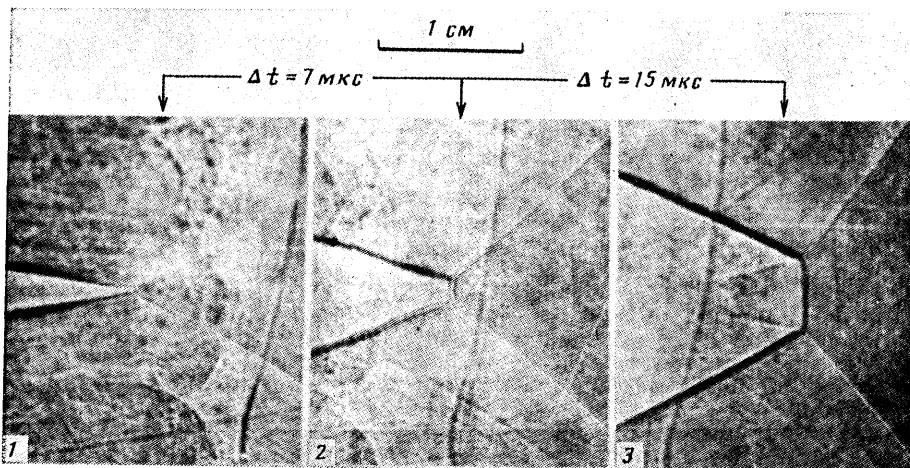
В настоящей работе исследуется картина течения, возникающего после прихода да кольцевой ударной волны в центр кольца.

Главным результатом является наблюдаемый при отражении кольцевой волны от оси симметрии факт образования ударной волны Маха при малых значениях осевой координаты z , отсчитываемой от центра кольца, причем нерегулярное отражение предсказывается на сколько угодно малых расстояниях от центра.

Как было показано теоретически [6], нерегулярное отражение кольцевой ударной волны при малых z обусловлено увеличением угла наклона фронта падающей волны к оси при ее ускоренном схождении. Этот вывод согласуется с хорошо известной гипотезой Куранта и Фридрихса [7] о том, что осесимметричная («коническая») сходящаяся ударная волна испытывает в любом случае нерегулярное отражение в отличие от плоской волны, которая может отражаться регулярным образом. В выполненной недавно работе [8] эта гипотеза доказана для конической ударной волны в совершенном газе.

1. Исследуемая ударная волна создавалась аналогично [3] с помощью поверхностного электрического пробоя большого числа (~ 100) искровых промежутков, расположенных на внутренней, обращенной к оси симметрии поверхности кольца. Радиус и толщина кольца $R_k = 5$ см, $h = 1$ см. Вкладываемая в разряд энергия $E \approx \leq 1,2$ КДж. Среднее значение числа Маха возникающей и распространяющейся к оси ударной волны $M_0 \sim 2$.

Визуализация ударной волны осуществлялась теньвым методом с лазерным источником света при просвечивании в направлении, перпендикулярном оси кольца. Показанная на фиг. 1 последовательность тенеграм получена в разных реали-



Фиг. 1

зациях процесса при изменении временной задержки импульса лазерного излучения. Пространственный масштаб и временные интервалы между фотографиями указаны на фигуре. Координаты, отвечающие положению волны Маха на оси; равны: $z_1=1,4$ см, $z_2=2,5$ см, $z_3=4$ см. Источник кольцевой ударной волны расположен слева.

На тенеграммах хорошо видно образование характерной для маховского отражения ударных волн конфигурации разрывов, показанной на фиг. 2. Здесь буквами обозначены: AI – падающая волна, AR – отраженная волна, AM – волна Маха, AE – контактный разрыв. На первой тенеграмме волна Маха из-за недостаточного пространственного разрешения не видна, зато заметно сильное искривление фронта падающей волны вблизи оси, как следствие ускорения волны при кумуляции. На фиг. 3 приведены экспериментальные значения радиуса r_M (кривая 2) и скорости волны Маха M_M (кривая 3), а также значение угла ν (кривая 4) между фронтом падающей волны и осью симметрии, измеренного в точке A (см. фиг. 2).

Если бы эффект кумуляции отсутствовал, то угол ν определялся бы формулой

$$\nu = \text{arctg}(z/R_k) \quad (1)$$

и переход от регулярного отражения волны от оси к нерегулярному происходил бы в точке, $\nu = \nu_c$ (ν_c – критический угол). Во всяком случае маховское отражение было бы невозможно при $\nu < \nu_s$ (ν_s – угол стационарного маховского отражения) [7, 9]. Координаты z_c , z_s , которые, согласно (1), соответствовали бы значениям $\nu_c \approx 40^\circ$ и $\nu_s \approx 30^\circ$ для $M_0 \approx 2,5$ [9], отмечены на фиг. 3.

Данные эксперимента доказывают, что волна Маха существует и при $z < z_c$, z_s . Более того, ход кривой $r_M(z)$ не противоречит утверждению, что отражение волны от оси при сколько угодно малых z – нерегулярное. Существование волны Маха при малых z связано с увеличением угла ν при ускоренном движении волны к оси, вследствие которого экспериментально наблюдаемые значения ν больше рассчитанных по (1).

Отметим, что в «спорной» области углов падения $\nu_s < \nu < \nu_c$ в рассматриваемом случае реализуется маховское отражение.

2. Интересно проверить изложенную в [6] теорию отражения осесимметричной (нецилиндрической) ударной волны от оси применительно к кольцевой волне.

Задача распространения кольцевой ударной волны рассматривалась в рамках теории Уизема [10], согласно которой поверхности фронтов ударных волн в каждый момент времени t описываются соотношением

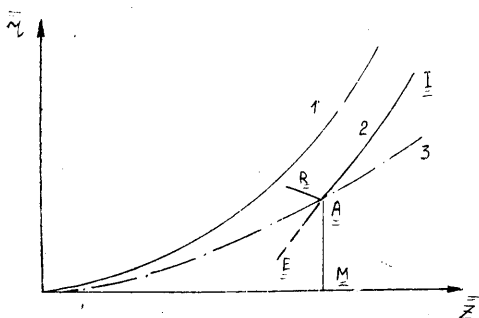
$$\Phi(r, z) + V_{s0}t = 0 \quad (2)$$

Здесь V_{s0} – скорость звука в невозмущенном газе, а функция $\Phi(r, z)$ подчиняется уравнению

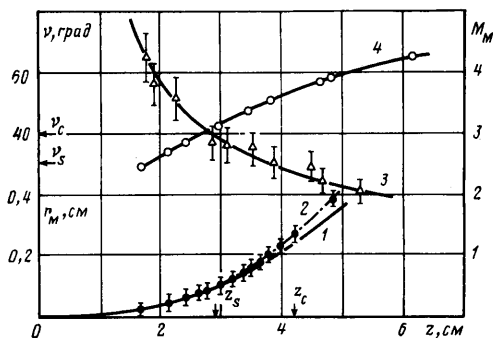
$$\text{div}(M^{n+1} \text{grad } \Phi) = 0, \quad M = |\text{grad } \Phi|^{-1} \quad (3)$$

где M – локальное число Маха ударной волны ($M \gg 1$), $n \approx 5,1$ для газа с $\gamma = 7/5$. Решение уравнения (3), описывающее поверхность фронта ударной волны вблизи оси симметрии, имеет вид [4]

$$\frac{\Phi}{R_0} = C \left[\frac{n}{n+1} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{1+1/n} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{R_0} \right)^2 - \frac{1}{2(n-1)} \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$



Фиг. 2



Фиг. 3

где R_0 – константа с размерностью длины, C – безразмерная константа, r и z – цилиндрические координаты.

В [4] выражение (4) анализировалось только при $t \leq 0$ и $r \geq r_0(z)$, где $r_0(z)$ – фронт волны при $t=0$ (кривая 1 на фиг. 2). Однако (4) имеет несколько большую область применимости, а именно $r \gg r_1(z)$ ($r_1(z) \sim R_0(z/R_0)^n$ – кривая 3 на фиг. 2). Используя метод сращиваемых асимптотических разложений, решение можно продолжить в область $r \sim r_1(z)$, где оно сшивается с волной Маха. Подробности вычислений приведены в [6]. Приведем конечный результат – траекторию тройной точки конфигурации Маха

$$r_M = \frac{R_0}{\cos \nu} \left(\frac{z_M}{R_0 \sin \nu} \right)^n \quad (5)$$

где ν есть функция χ – угла движения тройной точки относительно оси симметрии. В [6] соотношение (5) анализировалось только при $z_M \rightarrow 0$, когда $\chi=0$ и $\nu=\nu_s$.

В диапазоне наблюдаемых на эксперименте углов $30^\circ \leq \nu \leq 50^\circ$ и для $M_0 \geq 2$ зависимость $\chi=f(\nu)$ аппроксимируем выражением

$$\chi [\text{рад}] = 0,33 (\sin \nu \cos^{1/n} \nu - \sin \nu_{s0} \cos^{1/n} \nu_{s0}) \quad (6)$$

где $\nu_{s0}=22^\circ$ есть угол стационарного маховского отражения для $M \gg 1$.

Комбинация (5) и (6) ($dr_M/dz_M \approx \chi$) дает уравнение

$$\frac{dy}{dx} = 0,33 \left(\frac{x}{y^{1/n}} - 0,369 \right), \quad y = \frac{r_M}{R_0}, \quad x = \frac{z_M}{R_0} \quad (7)$$

Сравнение (5) с экспериментом дает для R_0 значение ≈ 12 см. Уравнение (7) решалось численно. Полученная зависимость приведена на фиг. 3 (кривая 1) вместе с экспериментальной. Теоретическая кривая дает оценку размера волны Маха при $z < 2$ см, где ее экспериментальное наблюдение затруднено.

Отражение кольцевой ударной волны от оси симметрии носит нерегулярный (маховский) характер при малых (согласно теории при сколько угодно малых) значениях осевой координаты $z < z_s, z_c$. Наблюдаемый характер отражения осесимметричной ударной волны вызван увеличением угла наклона падающей волны к оси при ее ускоренном схождении и является в конечном счете следствием кумуляции.

Авторы выражают благодарность С. В. Буланову, И. А. Коссову и А. А. Савину за полезные замечания и обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
2. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988. 171 с.
3. Бережецкая Н. К., Большаков Е. Ф., Голубев С. К. и др. Гидродинамические явления, сопутствующие кольцевому поверхностному разряду // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. Вып. 6. С. 1926–1931.

4. *Соколов И. В.* Поведение осесимметричной ударной волны вблизи точки кумуляции // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. Вып. 4. С. 1331–1335.
5. *Бархударов Э. М., Косый И. А., Мдивнишвили М. О. и др.* Неоднородные сходящиеся ударные волны // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 2. С. 164–170.
6. *Соколов И. В.* Высокоскоростные кумулятивные газовые струи. Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 4. С. 148–152.
7. *Курант Р., Фридрихс К.* Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 427 с.
8. *Соколов И. В.* Коническая ударная волна // Теплофиз. высоких температур. 1988. Т. 26. № 3. С. 560–566.
9. *Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г.* Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
10. *Уизем Дж. Б.* Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977. 622 с.

Москва

Поступила в редакцию
30.III.1989