

03

© 1991

КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТАЦИОНАРНОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С КОНИЧЕСКИМ ТЕЛОМ

Ю.М. Б е л е ц к и й, Д.Ф. Б ы к о в,
П.А. В о й н о в и ч, Е.Л. С а т у н и н а,
И.В. С о к о л о в, В.Е. Т е р е х и н

1. Введение. Хорошо известен эффект усиления одномерных сходящихся ударных волн (УВ) (цилиндрических и сферических [1, 2]) называемый кумуляцией. Например, для сильной цилиндрической УВ скорость фронта V при уменьшении радиуса r растет как

$$V \sim r^{-0.2}, \quad (1)$$

для показателя адиабаты $\gamma = 7/5$. Неодномерным аксиально симметричным сходящимся УВ также присуще свойство кумуляции [3-7], причем за образующимися при отражении от оси волнами Маха достигается более высокая температура, чем при отражении цилиндрической УВ от оси.

Новые возможности усиления кумулятивного эффекта появляются при исследовании взаимодействия кумулятивных УВ между собой и с твердыми поверхностями. В настоящей работе исследуется пример такого процесса - взаимодействие двумерной осесимметричной сходящейся УВ с твердым коническим острием в стационарном потоке. Рассматриваемая конфигурация течения представляет интерес как двумерный аналог процесса сжатия вещества встречными цилиндрическими лайнерами, позволяющего реализовать некоторые фазовые переходы при высоких давлениях [8]. Аналитический расчет течения в упрощенной постановке [9] указывает на возможность достижения высоких значений давления и плотности среды.

2. Качественная картина взаимодействия. Поясним, что мы называем стационарной осесимметричной сходящейся УВ.

В цилиндрической системе координат r, z, φ рассмотрим стационарное течение газа в области $z \geq 0, r \leq R_0$, такое, что через границу $z = 0$ в область втекает поток однородного газа со скоростью $D \gg c_0$ (c_0 - скорость звука), а на границе $r = R_0$ создается возмущение потока, которое сходится к оси в виде УВ (рис. 1а). В частности, такое течение возникает в сверхзвуковом конфузоре [10], где сходящаяся УВ начинается на сужении

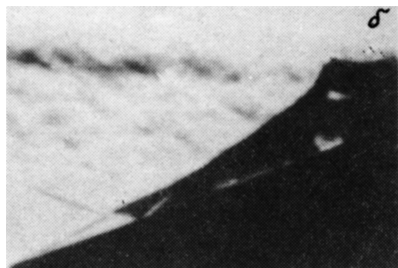
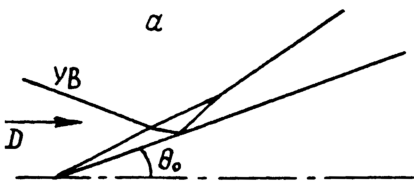


Рис. 1.

сечения круглой трубы. Предполагается, что при $r \ll R_0$ сходящаяся УВ взаимодействует с коническим острием, ось которого совпадает с прямой $r = 0$.

Свойства течения наиболее очевидны в случае, когда полуугол раствора конуса θ_0 и угол наклона фронта сходящейся УВ к оси $\nu \approx V/D$ (V - радиальная скорость фронта) малы: $\theta \ll 1$, $\nu \ll 1$. При этих условиях применима поршневая аналогия: во всем течении $u_z \approx D$ с точностью $O(\theta_0^2) + O(\nu^2)$, а уравнения радиального движения принимают вид:

$$D \frac{\partial \rho}{\partial z} + u_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u_r}{\partial r} + \rho u_r / r = 0, \quad (2)$$

$$\rho (D \frac{\partial u_r}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r}) = - \frac{\partial p}{\partial r}, \quad D \frac{\partial s}{\partial z} + u_r \frac{\partial s}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

(обозначения обычные) и сводятся к нестационарным уравнениям цилиндрически симметричного течения, в которых роль времени играет $\tau = z/D$. На поверхности конуса: $u_r = \tau g \theta_0$ при $r = \tau D \tau g \theta_0$.

Отсюда ясно, что при сжатии УВ к оси скорость УВ V возрастает как для цилиндрической УВ, и в случае $V \gg c_0$ возрастает по закону (1). При этом увеличивается и угол наклона сходящейся УВ к оси: $\nu \sim r^{-0.2}$. Если сходящаяся УВ отражается от конуса, когда угол ν еще мал, то отражение имеет регулярный характер и в рамках поршневой аналогии оно соответствует отражению сходящейся цилиндрической УВ от расширяющегося со скоростью $\tau g \theta_0$ цилиндрического поршня. Очевидно, что при этом давление и плотность увеличиваются сильнее, чем если бы волна отражалась от неподвижной стенки.

Тенеграмма рис. 1,б демонстрирует отражение сходящейся УВ от конического острия. Конус с $\theta_0 = 20^\circ$ помещался в струю M_2 с числом Маха $M \approx 3$ и статическим давлением $p_0 = 140$ Тор, которая формировалась соплом Лавала [11]. Давление вне струи $p_1 \approx 200$ Тор превышало p_0 , что приводило к образованию на срезе сопла сходящейся УВ. После взаимодействия с головной УВ сходящаяся УВ регулярно отражается от конуса.¹

¹Замечательное экспериментальное исследование различных режимов отражения УВ от конуса впервые выполнил А.В.Красильников.

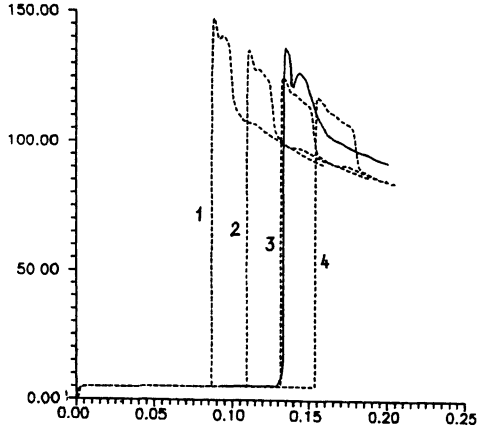


Рис. 2.

3. Численное моделирование кумулятивного эффекта. На равномерной лагранжевой шахматной сетке [12] (200 ячеек) рассчитывалось взаимодействие сходящейся цилиндрической УВ с цилиндрическим поршнем, расширяющимся со скоростью $M_0 \approx 1.65$. Сходящаяся УВ создавалась внешним поршнем, который сжимался со скоростью $M_1 \approx 1.32$ от радиуса $R_0 = 1$ до $R_1 = 0.6$ и затем останавливался. Момент начала движения внутреннего поршня выбран так, что сходящаяся УВ приходила на поршень при значении радиуса $r_0 \approx 0.13$. Показатель адиабаты $\gamma = 7/5$. Давление на внутреннем поршне $P(r)/P_0$ в зависимости от его радиуса r представлено на рис. 2 сплошной линией.

Согласно поршневой аналогии формулировка одномерной задачи отвечает следующей двумерной постановке: поток газа со скоростью скажем, $M = 10$ входит в осесимметричный конфузор, сужающийся от R_0 до R_1 с углом схождения $\tan \theta_1 = M_1/M \approx 0.132$. Сходящаяся УВ взаимодействует с конусом ($\tan \theta_0 = M_0/M \approx 0.165$), причем УВ приходит на сечение конуса с радиусом r_0 . Не представляет существенных трудностей и прямой (без поршневой аналогии) численный расчет этого двумерного течения, который был выполнен с помощью программы расчета стационарных разрывных течений идеального газа [13], основанной на маршевом методе расчета сверхзвуковых течений.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 штриховыми линиями. Распределение давления вдоль образующей поверхности конуса дано в зависимости от текущего значения координаты r . Различные кривые соответствуют различному положению вершины конуса z_0 на оси z относительно начала конфузора, генерирующего сходящуюся УВ. Кривые 1-4 соответствуют значениям $z_0 = 3.3R_0, 3.1R_0, 2.9R_0, 2.7R_0$ соответственно. Волновая картина течения в районе взаимодействия сходящейся УВ с конусом для $z_0 = 2.7R_0$ приведена на рис. 3 в виде изолиний поля плотности с шагом $\Delta \rho = 0.5 \rho_\infty$.

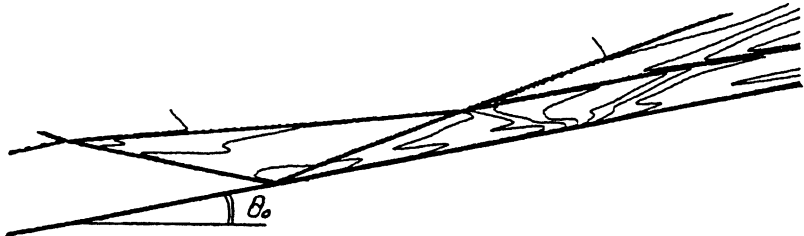


Рис. 3.

Результаты расчетов свидетельствуют о возможности многократного увеличения плотности и давления при взаимодействии стационарной осесимметричной сходящейся УВ с коническим острием. Хорошее совпадение двумерного расчета параметров течения с его одномерным аналогом указывает на эквивалентность рассматриваемого течения и билайнерного сжатия среды.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
- [2] Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988.
- [3] Бережецкая Н.К., Большаков Е.Ф. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 1926-1931.
- [4] Базанов О.В., Беспалов В.Е. и др. // ТВТ. 1985. Т. 23. С. 976-982.
- [5] Соколов И.В. // ТВТ. 1988. Т. 26. С. 560-566.
- [6] Соколов И.В. // Изв. АН СССР, сер. МЖГ. 1989. № 4. С. 148-182.
- [7] Бархударов Э.М., Мдивнишвили М.О. и др. // Изв. АН СССР, сер. МЖГ. 1990. № 5.
- [8] Соколов И.В. // ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 4. С. 867-870.
- [9] Соколов И.В., Тарасова Е.Л. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 12.
- [10] Мейер Р.Е. Газовая динамика / Под ред. С.Г. Попова и С.В. Фальковича. М.: ИЛ, 1950. С.7-57.
- [11] Быков Д.Ф., Голубев С.К., Грицинин С.И., Раевский И.М. // ПТЭ. 1991 (в печати).
- [12] Рихтмайер Р.Д., Мортон К.У. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
- [13] Белецкий Ю.М., Войнович П.А. Программа расчета сверхзвуковых стационарных разрывных течений идеального газа. Л.: Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, 1990.

Поступило в Редакцию
11 января 1991 г.