

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры. М., «Энергия», 1971.
2. Бобровская Р. С., Боргничук Н. И., Воропаев А. А., Донской А. В., Дресвин С. В., Крутянский М. М. Параметры открытой дуги, стабилизированной продольным потоком аргона. — ПМТФ, 1973, № 1.
3. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., «Энергия», 1970.

УДК 533.6.011

ИЗУЧЕНИЕ ДВУМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ
В РАДИАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Н. П. Гриднев, В. А. Деревянко, В. Ф. Куликсв

(Новосибирск)

Несмотря на значительное развитие за последние годы численных методов, решение задач газовой динамики, связанных с ударно-волновыми процессами, остается еще сложной проблемой. Одной из таких задач является расчет нестационарных двумерных течений в T -образных каналах при выходе ударной волны из плоской или цилиндрической трубы. Наиболее изученным моментом в этой задаче является сам выход из узкого канала в широкий и образование дифрагированной ударной волны. Этому вопросу посвящен ряд теоретических [1—3] и экспериментальных работ [4,5]. Менее изучен, особенно в теоретическом плане, вопрос отражения дифрагированной ударной волны от торцевой стенки и дальнейшее развитие течения в канале. Трудность заключается в том, что в зоне отраженных ударных волн появляются значительные градиенты параметров потока. Последнее обстоятельство обуславливает неустойчивость разностной схемы и приводит к сильным осцилляциям. В некоторых случаях это явление можно ослабить, вводя в разностную схему сглаживающие члены [6]. Между тем известно, что схемы повышенного порядка точности дают значительно меньшие осцилляции вблизи разрыва [7], кроме того, зона «размазывания» разрыва для этих схем минимальна. Предварительные расчеты одномерного отражения падающей ударной волны от твердой стенки показали, что эти схемы устойчивы при значительном количестве шагов по времени ($n = 800$) и дают высокую степень точности в зоне отраженных ударных волн [8].

С учетом этих обстоятельств для проведения расчетов нестационарного течения в радиальных каналах выбрана схема третьего порядка точности. аналогичная схеме, описанной в работе [9].

Система уравнений газовой динамики записывается в дивергентной форме и имеет следующий вид:

$$\partial \mathbf{f} / \partial t + \partial \mathbf{F}(\mathbf{f}) / \partial z + \partial \mathbf{G}(\mathbf{f}) / \partial r + \mathbf{H}(\mathbf{f}, r) = 0;$$

$$\mathbf{f} = \begin{vmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ l \end{vmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (l + p)u \end{vmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{vmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (l + p)v \end{vmatrix} \quad \mathbf{H} = 1/r \begin{vmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (l + p)v \end{vmatrix},$$

где $l = \rho u^2 / 2 + \rho v^2 / 2 + p / (\gamma - 1)$.

В качестве масштабов плотности, скорости, давления, температуры взяты соответственно значения $\rho, c, \rho c^2, T$ в невозмущенном газе перед

падающей ударной волной. В этом случае параметры газа в невозмущенном потоке имеют значения $\rho = 1$, $p = 1/\gamma$, $T = 1$. Граничное условие на твердых стенках задается в виде условия непротекания $v_n = 0$. Газ предполагается невязким и нетеплопроводным.

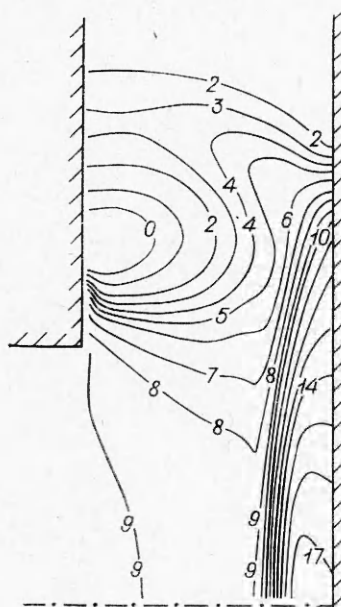
Расчеты проведены на машине БЭСМ-6. Программа составлена на языке α -6. С целью сохранения документальности результаты расчетов с помощью машинной графики выводились в виде поля изолиний (изобары, изохоры) и поля скоростей. Для контроля выдавалась цифровая информация. Параметры падающей ударной волны и размеры канала, заложенные в расчетах, брались из эксперимента.

Эксперимент проводился на ударной трубе диаметром 55 мм, которая заканчивалась радиальным каналом шириной 24 мм. Радиальный канал помещался внутрь вакуумной камеры с двумя оптическими окнами для тепловизионной съемки.

Исследование процесса отражения дифрагированной ударной волны и дальнейшего течения в радиальном канале проведено методом Теплера совместно со скоростной покадровой съемкой камерой СФР.

Шлирен-прибор собран из серийно выпускаемых объективов. Схема прибора обычна. Для совместной работы прибора и скоростной фотокамеры СФР-2М после ножа ставились два объектива, как в [10]. Источником света служила лампа ИФП-2000, на которую разряжалась искусственная длинная линия. Пучок света проходил параллельно стенкам радиального канала и собирался в плоскости ножа, кромка которого также устанавливалась параллельно стенкам канала. Теневое изображение процесса в радиальном канале проектировалось на фотопленку СФР. Время экспозиции одного кадра 3 мкс. Ввиду симметрии процесса половина канала закрывалась непрозрачным экраном. Ударная волна с числом $M = 6,3$ создавалась в аргоне при начальном давлении 25 мм рт. ст.

Результаты расчетов и эксперимента представлены на фиг. 1—5, причем эти графики и фотографии дают развитие одного и того же процесса во времени. На фиг. 1, 2 изображено поле равных плотностей (изохоры) в различные моменты времени, причем на фиг. 1 дан начальный этап отражения дифрагированной ударной волны от торцевой стенки канала, а на фиг. 2 — момент, когда отраженная ударная волна переходит в стоячую ударную волну и дальнейшее развитие процесса идет в основном в радиальном направлении. Кроме поля плотностей, на фиг. 3 приводится поле равных давлений (изобары) и на фиг. 4 — поле скоростей, соответствующих тому же моменту времени, что и на фиг. 2. Анализ поля скоростей (фиг. 4) показывает, что за отраженной ударной волной в зоне оси симметрии возникает застойная зона, выше которой происходит разворот потока в радиальном направлении. Скорость газа в этом направлении становится близкой к скорости газа за падающей ударной волной, и в радиальном направлении формируется ударная волна (см. фиг. 2, 3), сливающаяся с дифрагированной ударной волной.



Фиг. 1



Ф и г. 5

Сложная структура течения возникает в осевом направлении. Это связано с тем, что отраженная ударная волна распространяется не по однородному газу, а взаимодействует с волной разрежения, исходящей из угла канала. Последнее обстоятельство вызывает искривление ударной волны и появление дополнительного градиента плотности (контактный разрыв) за ней (изохоры в этом месте имеют точку перегиба). На тепловых снимках (фиг. 5) это приводит к появлению λ -ножки, опирающейся своим основанием на ось симметрии. На ранней стадии отражения дифрагированной волны от стенки канала такое явление не имеет места (первый кадр фиг. 5), так как взаимодействие волны разрежения с отраженной волной еще слабое.

Результаты эксперимента, представленные на фиг. 5, несмотря на недостаточное временное разрешение, позволяют достаточно четко проследить общую картину развития процесса и дают хорошее совпадение с результатами расчетов. Это касается как пространственно-временного развития процесса, так и ударно-волновой структуры течения.

Так как изучаемый процесс течения достаточно сложный, то для выявления его характерных свойств приходилось на фиг. 1—3 наносить большое количество изолиний, каждая из которых маркировалась номе-

Номер-фигуры	Параметр	Номер кривой																	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	ρ	0,64	0,84	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,7	3,2	3,7	4,2	4,8	5,3	5,8	6,4	6,9	7,4	8
2	ρ	1,1	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,8	4,2	4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	6,6		
3	p	2	3,4	2,5	5,1	7,6	10	14	19	27	36	44	53	61	70	78	87		

ром. Соответствие между значением плотности, давления и номером кривых приводится в таблице.

Значения давления, плотности и скорости газа за падающей ударной волной при $M = 6,3$ и $\gamma = 1,67$ равны в безразмерных единицах соответственно 29,5; 3,7 и 3,6. В верхней части фиг. 4 отложен масштаб величины скорости (3,6). Векторы скорости, основания которых помечены ромбиком, нанесены не в масштабе, а только показывают направление течения, величина их лежит в пределах от 0,3 до 0,5.

Поступила 30 XII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Русанов В. В. Расчет взаимодействия нестационарных ударных волн с препятствиями.— ЖВММФ, 1961, т. 1, № 2.
2. Рудакова Г. М., Шашкин А. П. К расчету некоторых плоских нестационарных течений газа.— «Изв. СО АН СССР», 1975, вып. 1.
3. Тарнавский Г. А., Хоничев В. И., Яковлев В. И. Дифракция ударной волны на прямом угле и на выходе из плоского канала.— «Изв. СО АН СССР», 1974, № 8, вып. 2.
4. Skews W. W. The shape of diffraction shock wave.— «J. Fluid Mech.», 1967, vol. 29, N 2.
5. 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.
6. Ивандаев А. И. Об одном способе введения «псевдовязкости» и его применение к уточнению разностных решений уравнений гидродинамики.— ЖВММФ, 1975, т. 15, № 2.
7. Русанов В. В. Разностные схемы третьего порядка точности для сквозного счета разрывных решений.— «Докл. АН СССР», 1968, т. 180, № 6.
8. Гриднев Н. П., Яковлев В. И. Использование разностных схем повышенного порядка точности для расчета отраженных ударных волн.— В кн.: Вопросы газодинамики. Новосибирск, изд. ИТНМ СО АН СССР, 1975.
9. Еремин В. В., Липницкий Ю. М. О построении многомерных разностных схем третьего порядка точности.— ЖВММФ, 1974, т. 14, № 2.
10. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстро протекающих процессов. М., «Наука», 1975.

УДК 533.6.011

ОБ ЭНТРОПИЙНОМ СЛОЕ В ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Н. Е. Ермолин

(Новосибирск)

Рассмотрим плоские и осесимметричные гиперзвуковые течения совершенного газа за скачком уплотнения, удовлетворяющим условию $\cos(\mathbf{n}, \mathbf{i}) \leq \tau$, $\cos(\mathbf{n}, \mathbf{j}) \sim 1$ всюду, за исключением малой окрестности вершины. Здесь малый параметр $\tau \ll 1$; \mathbf{n} — нормаль к поверхности фронта; \mathbf{i} — орт оси x_1 ; \mathbf{j} — орт оси x_2 ; Lx_i ($i = 1, 2$) — прямоугольная декартова система координат; L — характерная длина. Набегающий поток предполагаем однородным. Считая выполненным условие $K = M_\infty \tau \geq 1$ для формы скачка в вершине, близкой к степенной, рассмотрим на основе метода сращиваемых асимптотических разложений поведение решения