

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1972

УДК 533.011:534.222.2

Л. С. ШТЕМЕНКО

ОБРАЗОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

В работе рассматривается вопрос о возникновении волн сжатия конечной амплитуды в ударной трубе, взаимодействие которых приводит к образованию ударной волны. Показано, что волны сжатия могут возникать непосредственно за фронтом нестационарного скачка уплотнения, образующегося в струе толкающего газа в процессе раскрытия диафрагмы.

Задача о движении газа, заключенного в полубесконечный цилиндр, ограниченный с одного конца ускоренно движущимся поршнем, впервые была решена Гюгонио [1]. Он исходил из нелинейного волнового уравнения одномерного движения идеального баротропного газа. Поршень при своем движении порождает волны конечной амплитуды, которые догоняют друг друга и образуют ударный разрыв. Гюгонио рассчитал место его образования.

Многие авторы [2, 3, 4, 5], рассматривая работу реальной ударной трубы, считают, что толкающий газ в ней можно отождествить с подвижным поршнем, ускоренное движение которого вызывается постепенным раскрытием диафрагмы. Однако экспериментально вопрос о возникновении волн сжатия в ударной трубе не изучался. Процесс формирования ударной волны в ударной трубе существенно неоднороден [3, 5, 6]. Поэтому очень сложно расчетом проверить правильность тех или иных предположений об образовании ударной волны.

В настоящей работе изучается механизм образования ударной волны в ударной трубе.

Опыты проведены в ударной трубе прямоугольного сечения 34×72 при перепадах давления на диафрагме $p_4/p_0 = 20 \div 220$, временах раскрытия диафрагмы $200 \div 550$ мксек, скорости звука в камере ударной трубы $340 \div 735$ м/сек.

В канале ударной трубы был воздух, в камере — смесь азота или гелия с воздухом. Течение газа в ударной трубе визуализировалось с помощью теневого прибора ИАБ-451 и фоторегистраторов ЖФР и СФР, позволяющих получать временные развертки и последовательные кадры течения. Получены шлирен и теневые изображения течения газа в ударной трубе.

По временным разверткам течения измерялась скорость распространения возмущений. Для измерений отбирались только те опыты, в которых диафрагма раскрывалась симметрично. (Диафрагмы с кресто-

образной насечкой раскрывались в виде четырех треугольных лепестков, движение боковых лепестков фиксировалось на развертках течения.) При этом, как показал анализ кадров течения, нормаль к поверхности фронта возмущений на оси трубы совпадает с направлением щели. Максимальная ошибка в измерении скорости ударной волны составляла 3%, слабых возмущений — 20%.

На рис. 1 (*a* и *b*) представлены фотографии процесса раскрытия диафрагмы в ударной трубе, сопровождающегося течением газа из ка-

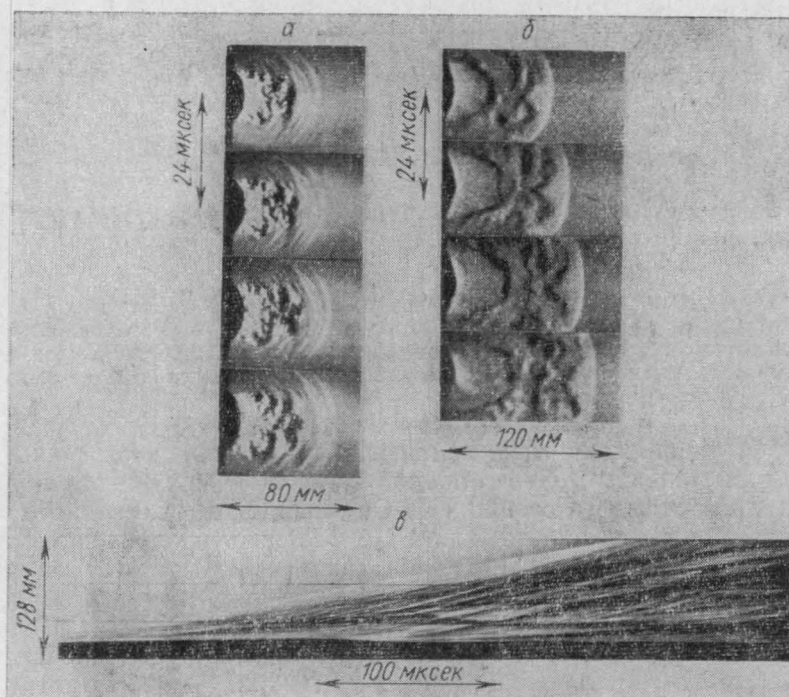


Рис. 1. Течение газа около раскрывающейся диафрагмы: *a* — последовательные кадры течения ($p_4=4,5$ и $p_0=1$ атм, $C_4=640$ м/сек); *б* — последовательные кадры течения ($p_4=7,5$ атм, $p_0=50$ мм рт. ст., $C_4=735$ м/сек), *в* — временная развертка течения ($p_4=7,5$ атм, $p_0=250$ мм рт. ст., $C_4=735$ м/сек)

меры в канал. На фотографиях видны границы струн истекающего газа и возмущения, бегущие в покоем газе. Возмущения догоняют друг друга и образуют более сильные возмущения. Последние в свою очередь и создают ударную волну. На фотографиях видно, что возмущения (волны сжатия) возникают не у границы струи толкающего газа, а идут из его глубины. Возникает вопрос, где и как рождаются волны сжатия в ударной трубе? В связи с этим было детально изучено нестационарное течение газа вблизи раскрывающейся диафрагмы. На фотографиях (рис. 1, *б*) четко видно характерное возмущение искривленной формы, края которого опираются на отверстие в диафрагме. Цвет возмущения темный, в противоположность светлой ударной волне. Следовательно, по теории шлирен-метода, направление градиента плотности здесь противоположно направлению градиента плотности в ударной волне, т. е. за возмущением плотность больше, чем перед ним.

Возмущение — назовем его разрывом Гюгоньо — движется в толкающем газе относительно лабораторной системы координат со скоростью 100—300 м/сек, зависящей от начального перепада давления на диафрагме, быстроты изменения площади отверстия в ней и скорости звука в камере ударной трубы. С увеличением перечисленных факторов скорость разрыва растет [7].

Если считать течение квазистационарным, то образование разрыва Гюгоньо можно объяснить следующим образом: струя толкающего

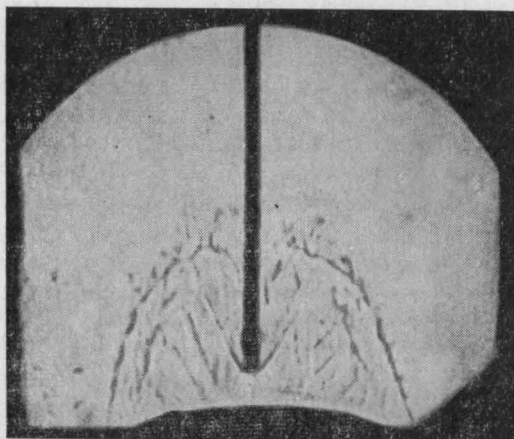


Рис. 2. Обтекание струей азота тонкого цилиндрического тела, установленного на оси струи в канале ударной трубы на расстоянии 0,29 калибра от диафрагмы. ($p_4=7,5$ атм, $p_0=25$ мм рт. ст., $C_4=340$ м/сек)

газа вблизи диафрагмы в начальный период ее раскрытия имеет звуковую скорость, так как перепад давления на диафрагме много больше критического. Далее струя расширяется, ско-

рость ее становится сверхзвуковой. При этом давление в струе падает ниже давления в канале, и возникает скачок уплотнения — разрыв Гюгоньо. По мере падения перепада давления между камерой и каналом, скачок уплотнения должен двигаться к диафрагме, подобно скачку у среза сопла в перерасширенной струе газа. С другой стороны, разрыв Гюгоньо все время сносится сверхзвуковой струей газа, истекающей из камеры ударной трубы. В лабораторной системе координат скачок движется ускоренно до тех пор, пока не достигнет боковых стенок ударной трубы, от которых он отражается. Сначала отражение правильное, затем наблюдается и маховское отражение.

Было измерено число M струи азота перед скачком по обтеканию ею тонкого цилиндрического тела с закругленным носком (диаметр закругления 2,5 мм). Тело устанавливалось по оси струи в канале ударной трубы на расстояниях $l/D=0,29$ и $0,54$ калибра от диафрагмы. Гидравлический диаметр полного отверстия в диафрагме D равен 28 мм. На фотографии рис. 2 виден разрыв Гюгоньо, возникший в струе толкающего газа, и скачок уплотнения у тела, образующийся при обтекании его этой струей. Число M струи вычислялось по измеренному на фотографиях углу наклона ветвей скачка уплотнения к оси струи (на расстоянии 2—3 диаметров закругления носка тела от оси

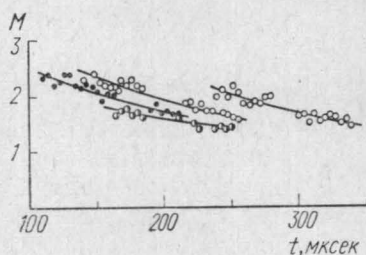


Рис. 3. Изменение числа M струи азота во время раскрытия диафрагмы. 1 — $p_0=257$, 2 — $p_0=87$, 3 — $p_0=50$ мм рт. ст. ($l/D=0,29$); 4 — $p_0=50$ мм рт. ст. ($l/D=0,54$); l — расстояние от диафрагмы, D — гидравлический диаметр полного отверстия в диафрагме, p_0 — начальное давление в канале ударной трубы (кривые расположены по порядку номеров от оси абсцисс вверх)

Струя толкающего газа вблизи диафрагмы в начальный период ее раскрытия имеет звуковую скорость, так как перепад давления на диафрагме много больше критического. Далее струя расширяется, скорость ее становится сверхзвуковой. При этом давление в струе падает ниже давления в канале, и возникает скачок уплотнения — разрыв Гюгоньо. По мере падения перепада давления между камерой и каналом, скачок уплотнения должен двигаться к диафрагме, подобно скачку у среза сопла в перерасширенной струе газа. С другой стороны, разрыв Гюгоньо все время сносится сверхзвуковой струей газа, истекающей из камеры ударной трубы. В лабораторной системе координат скачок движется ускоренно до тех пор, пока не достигнет боковых стенок ударной трубы, от которых он отражается. Сначала отражение правильное, затем наблюдается и маховское отражение.

струи). При этом получают несколько заниженные значения числа M с максимальной ошибкой 20%, ошибка отдельных измерений не превышает 10%. На рис. 3 показано изменение числа M струи азота во время раскрытия диафрагмы. По оси ординат отложено число M струи, по оси абсцисс — время в мксек от начала раскрытия диафрагмы. Кривые 1, 2 и 3 относятся к начальному давлению в канале ударной трубы p_0 , равному 257, 87 и 50 мм рт. ст., соответственно, и расстоянию от диафрагмы до тела $l/D=0,29$ калибра, кривая 4 — к начальному давлению $p_0=50$ мм рт. ст. и расстоянию $l/D=0,54$ калибра. (Кривые 1, 2, 3 и 4 расположены по порядку от оси абсцисс вверх.) Начальное давление азота p_4 в камере ударной трубы для всех опытов равно 7,5 атм. Как видно из рис. 3, на ранней стадии раскрытия диафрагмы число M струи азота достигает значения 2,5 и по мере дальнейшего раскрытия диафрагмы падает до $M=1,5$ тем быстрее, чем меньше давление в канале. Из сравнения кривых 3 и 4 видно, что число M струи растет с удалением от диафрагмы.

Число M струи можно описать следующей эмпирической формулой:

$$M = (1,4 + 3 \cdot 10^{-3} p_4/p_0) (t_g/t)^{1/3} (l/D)^{1/3},$$

где l — расстояние от диафрагмы по оси струи, D — гидравлический диаметр полного отверстия в диафрагме, t_g — время полного раскрытия диафрагмы, t — текущее время от начала ее раскрытия, p_4/p_0 — начальный перепад давления на диафрагме.

На временных развертках течения струи азота перед разрывом Гюгонио и после него видны наклонные линии. Это следы слабых возмущений в струе. По углу наклона этих линий к оси времени можно вычислить скорость движения возмущений в газе u_1+c_1 (перед разрывом Гюгонио) и u_2+c_2 (после него) на оси струи. Здесь u_i и c_i — скорость потока и скорость звука соответственно.

Измеряя по фоторазвертке течения u_1+c_1 и зная M_1 , рассчитали значения u_1 и c_1 на разных расстояниях от диафрагмы непосредственно перед разрывом Гюгонио в одном и том же опыте. По полученным значениям c_1 и начальному давлению в камере p_4 рассчитали значения ρ_1 и p_1 в тех же точках, предполагая процесс расширения струи из камеры в канал ударной трубы адиабатическим. Далее из соотношений на скачке уплотнения и по значениям c_1 , u_1 , M_1 , ρ_1 , p_1 получили значения c_2 , u_2 , M_2 , ρ_2 и p_2 непосредственно за фронтом разрыва Гюгонио на разных расстояниях от диафрагмы в одном и том же опыте. Рассчитанные таким образом значения u_2+c_2 сравнили с измеренными на фоторазвертке.

p_4/p_0	l , мм	(u_2+c_2) м/сек _{эксп}	(u_2+c_2) м/сек _{вычисл.}
40	46	340	370
65	52	380	380
90	57	400	400
110	61	410	400

В таблице приведены результаты расчетов и измерений скорости возмущений за фронтом разрыва Гюгонио u_2+c_2 для различных начальных перепадов давлений на диафрагме p_4/p_0 . Там же приведены расстояния l от диафрагмы, на которых измерялись и рассчитывались

скорости u_2+c_2 . Как показывают данные таблицы, совпадение экспериментальных и рассчитанных значений u_2+c_2 хорошее.

На рис. 4 представлена зависимость от времени параметров струи азота непосредственно перед фронтом разрыва (а) и после него (б) для перепада давления на диафрагме $p_4/p_0=110$. Время отсчитывается от начала раскрытия диафрагмы. Как видно из рис. 4, б, давление

непосредственно за разрывом Гюгонио резко возрастает по мере раскрытия диафрагмы. Скорость изменения давления во времени $\frac{dp}{dt}$ также растет за фронтом разрыва Гюгонио. Значения $\frac{dp}{dt}$ получены графическим дифференцированием кривой $p(t)$ рис. 4, б. За время раскрытия диафрагмы $\frac{dp}{dt}$ составляет 8—6% от соответствующих по времени значений давления.

Существование в струе такого быстроменяющегося давления, как известно из нелинейной акустики, должно приводить к возникновению волн сжатия конечной амплитуды [8]. Скорость движения этих волн

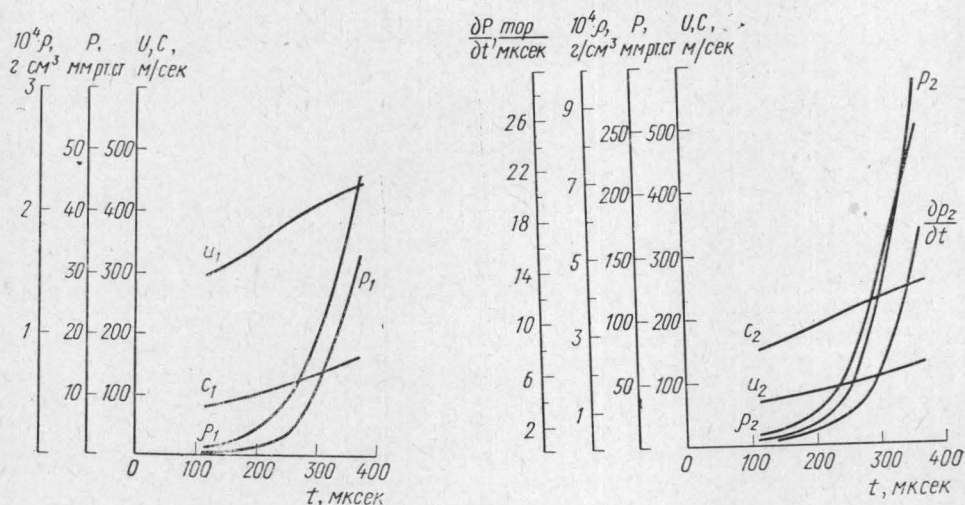


Рис. 4. Изменение параметров струи азота во время раскрытия диафрагмы. p — давление, ρ — плотность, C — скорость звука, u — скорость потока, $\frac{dp}{dt}$ — скорость изменения давления во времени: значения параметров непосредственно перед фронтом разрыва Гюгонио (слева) и значения параметров непосредственно за фронтом разрыва Гюгонио (справа)

со временем возрастает вслед за увеличением изменения давления. Таким образом, возможно, что волны сжатия, образующие ударную волну в ударной трубе, возникают непосредственно за фронтом разрыва Гюгонио и благодаря его существованию.

Автор выражает благодарность научному руководителю проф. А. С. Предводителеву, а также доценту Ф. В. Шагаеву за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hugoniot H. J. de l'ecole polytechn, 58, 1—125, 1889.
2. White D. R. Fluid Mech., 4, No. 6, 585—590, 1958.
3. Хеншелл Б. Сб. «Ударные трубы». Под ред. Х. А. Рахматуллина и С. С. Семенова, 1962.
4. Файзуллов. Труды ФИАН, т. 18, 1962.
5. Баженова Т. В., Набоко И. М., Предводителева О. А. Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах. Под ред. А. С. Предводителева. М., «Наука», 1964.
6. Штеменко Л. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 1, 1967.
7. Штеменко Л. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 3, 1968.
8. Эйхенвальд А. А. «Успехи физических наук», 14, 552—585, 1934.

Поступила в редакцию
25.5 1971 г.

Кафедра
молекулярной физики