

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3—1968

УДК 533.011 : 534.222.2

Л. С. ШТЕМЕНКО

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ВБЛИЗИ ДИАФРАГМЫ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

Экспериментально обнаружен скачок уплотнения, возникающий у раскрывающейся диафрагмы в ударной трубе в начальный период формирования основной ударной волны. Скачок движется в толкающем газе со скоростью, зависящей от начального перепада давления на диафрагме, скорости звука в камере и быстроты изменения площади отверстия в диафрагме. Оценено число Маха скачка уплотнения перед моментом его распада. Оно равно 2—2,6 при перепадах давления на диафрагме 40—110 и скорости звука в толкающем газе 340 м/сек.

В настоящей работе экспериментально изучено движение скачка уплотнения, который существует около диафрагмы в начальный период формирования ударной волны, движущейся по покоящемуся газу. Опыты проведены в ударной трубе прямоугольного сечения размером 34×72 . Схема установки и методика эксперимента описаны ранее [1]. В камере ударной трубы находился азот или смесь гелия с воздухом, в канале — воздух. В опытах использовались диафрагмы, раскрывающиеся в виде четырех треугольных лепестков (диафрагмы 1) и в форме двух прямоугольных створок (диафрагмы 2).

В последнем случае течение газа близко к плоскому, в первом случае оно приближается к осесимметричному. Время раскрытия диафрагм 1 от 400 до 550 мксек, диафрагм 2 — от 200 до 350 мксек.

На рис. 1, а показаны последовательные кадры течения газа около диафрагмы 1. На снимках видна граница вытекающей из камеры струи сжатого газа. Перед струей по покоящемуся газу движется ударная волна. На кадрах видно возмущение, напоминающее язык пламени, края которого опираются на отверстие в диафрагме. По мере увеличения отверстия растет и размер возмущения. Это возмущение и представляет собой исследуемый скачок уплотнения. На существование подобной картины течения и образование скачка уплотнения в струе около отверстия впервые указали Гюгонно [2] и Чаплыгин [3] при рассмотрении истечения газа из полубесконечного сосуда в среду при перепаде давления выше критического. В дальнейшем скачок уплотнения, возникающий у раскрывающейся диафрагмы в ударной трубе, будем называть разрывом Гюгонно.

На рис. 1, б представлены кадры течения газа около диафрагмы 2. Из сравнения кадров рис. 1, а и 1, б видно, что форма разрыва Гюго-

нио зависит от формы отверстия, образующегося при постепенном раскрытии диафрагмы.

Для изучения движения разрыва Гюгоннио были сняты временные развертки течения газа около диафрагмы в ударной трубе (рис. 2а, 2б).

На развертке рис. 2а видна ударная волна и догоняющие ее волны сжатия. Кроме ударной волны, распространяющейся в толкаемом газе, на снимке четко виден разрыв Гюгоннио, движущийся в толкающем газе. Скорость разрыва в лабораторной системе координат сначала растет, а затем постепенно уменьшается до нуля. В опытах было исследовано движение разрыва Гюгоннио в зависимости от различных факторов: перепада давления на диафрагме, скорости звука в толкающем газе и скорости изменения площади отверстия в сечении диафрагмы.

Рассмотрим влияние каждого из этих факторов в отдельности.

На рис. 3а представлены графики движения $l(t)$ разрыва Гюгоннио (путь его во времени) для разных начальных перепадов давления на диафрагме при близких временах ее раскрытия (440 ± 20 мксек). Использовались диафрагмы 1, в камере был азот. Как видно из графиков, скорость разрыва тем больше, чем больше перепад давления на диафрагме.

На рис. 3б по оси ординат отложена скорость разрыва Гюгоннио в м/сек, по оси абсцисс — время в мксек. Величина скорости получена дифференцированием приведенных выше графиков движения разрыва $l(t)$.

Рис. 3б показывает, что в начальный период раскрытия диафрагмы скорость разрыва Гюгоннио быстро растет, затем уменьшается до нуля, т. е. разрыв останавливается на определенном расстоянии от диа-

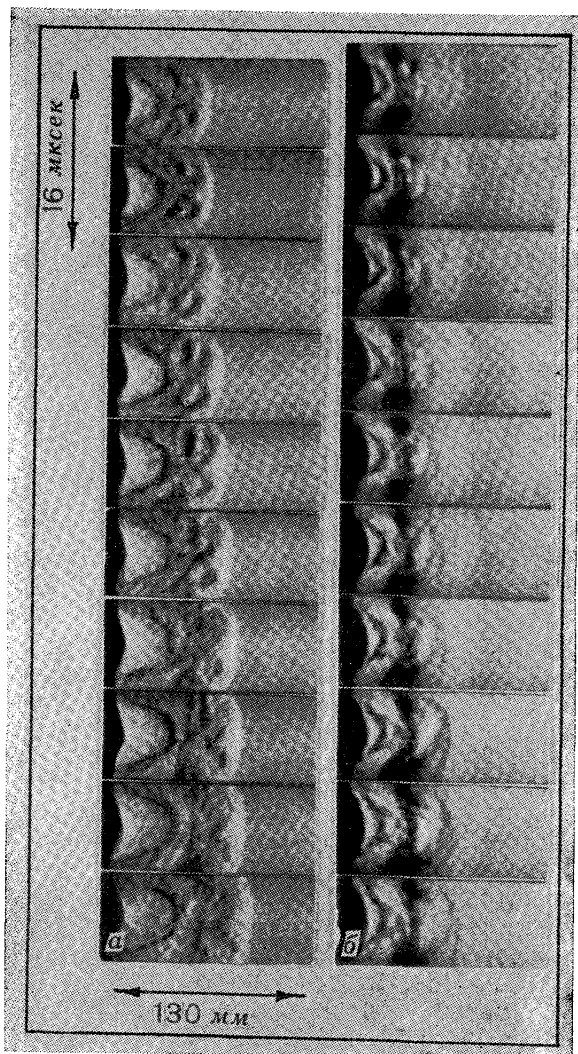


Рис. 1. Последовательные кадры течения газа около раскрывающейся диафрагмы. а — диафрагма (1) раскрывается в виде четырех треугольных лепестков ($p_4=7,5$ атм., $p_0=50$ мм рт. ст., $c_4=735$ м/сек); б — диафрагма (2) раскрывается в форме двух прямоугольных створок ($p_4=4,5$ атм., $p_0=50$ мм рт. ст.; $c_4=640$ м/сек)

фрагмы. Из графиков рис. 3, *a* видно, что время, в течение которого разрыв Гюгонио остается неподвижным, тем больше, чем меньше перепад давления на диафрагме, а расстояние от диафрагмы, на котором останавливается разрыв, растет с увеличением перепада давления.

На рис. 4 дана зависимость этого расстояния l_{\max} (в приведенных калибрах) от перепада давления на диафрагме p_4/p_0 .

Интересно, что разрыв Гюгонио через некоторое время после того, как он останавливается, распадается на два возмущения. На рис. 2*a* и 2*b* четко видны эти возмущения. Назовем первым из них то, которое

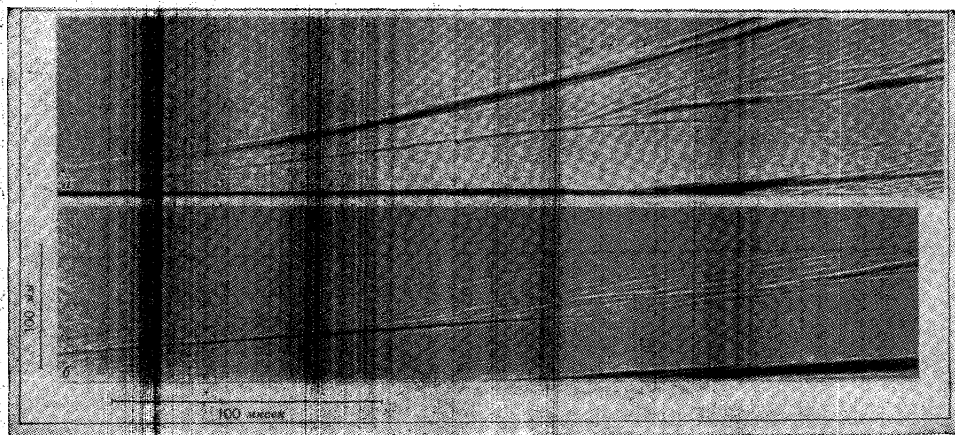


Рис. 2. Временные развертки течения газа около раскрывающейся диафрагмы (1). *a* — $p_4=7,5$ атм., $p_0=63$ мм рт. ст., $c_4=735$ м/сек; *b* — $p_4=1,5$ атм., $p_0=28$ мм рт. ст., $c_4=340$ м/сек

движется с большей скоростью. На графике рис. 5 приведены скорости возмущений в начальный момент после распада разрыва Гюгонио в зависимости от перепада давлений на диафрагме. Нижняя кривая представляет скорость второго возмущения, средняя — первого при скорости звука в толкающем газе $c_4=340$ м/сек. Верхняя кривая представляет скорость первого возмущения при скорости звука в толкающем газе $c_4=640$ м/сек. Скорости двух возмущений несколько увеличиваются по мере их движения.

Рассмотрим влияние скорости звука в толкающем газе и быстроту изменения площади отверстия в сечении диафрагмы на движение разрыва Гюгонио. Графики рис. 3, *b* характеризуют движение разрыва Гюгонио при одном и том же перепаде давления $p_4/p_0=95$ на диафрагме. Времена ее раскрытия близки друг к другу (490 ± 20 мксек). Скорость звука в толкающем газе равна 735, 590 и 340 м/сек для верхней, средней и нижней кривой соответственно. Из графика видно, что увеличение скорости звука в толкающем газе приводит к заметному возрастанию скорости разрыва Гюгонио на участке его ускоренного движения.

На рис. 3, *г* показано движение разрыва Гюгонио для разных времен раскрытия диафрагмы при постоянных значениях перепада давления на ней и скорости звука в толкающем газе ($c_4=340$ м/сек). Характер изменения площади отверстия в диафрагме для всех кривых одинаков, применялись диафрагмы 1. Две верхние кривые получены при перепаде давления $p_4/p_0=115$, две нижние — при перепаде давления $p_4/p_0=40$. Графики показывают, что скорость разрыва Гюгонио падает

с увеличением времени раскрытия диафрагмы. С ростом перепада давления этот эффект становится менее заметным.

Проследим за движением разрыва Гюгоньо при разном характере изменения площади отверстия в диафрагме. На рис. 6 нанесены графики движения разрыва и соответствующее изменение во времени площади отверстия в диафрагме. По оси ординат отложен путь разрыва Гюгоньо $l(t)$, отнесенный к расстоянию l_{\max} , и относительный размер отверстия в диафрагме S/S_0 , по оси абсцисс — время в мксек. Перепад

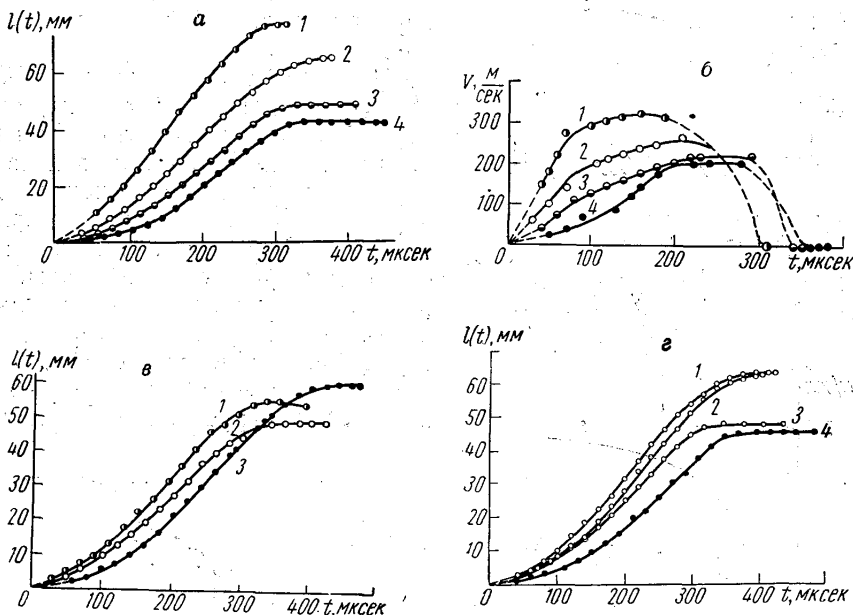


Рис. 3. Движение скачка уплотнения в зависимости от различных факторов: а и б — начального перепада давления на диафрагме p_4/p_0 . 1 — $p_4/p_0=230$, 2 — $p_4/p_0=115$, 3 — $p_4/p_0=40$, 4 — $p_4/p_0=20$, 1, 2, 3, 4 — $c_4=340$ м/сек, $t=440 \pm \pm 20$ мксек; в — скорости звука в толкающем газе; 1 — $c_4=735$ м/сек, 2 — $c_4=590$ м/сек, 3 — $c_4=340$ м/сек, 1, 2, 3 — $p_4/p_0=95$, $t=490 \pm 20$ мксек; г — быстроты изменения площади отверстия в диафрагме. 1 — $t=420$, 2 — $t=510$, 3 — $t=450$, 4 — $t=520$ мксек; 1, 2 — $p_4/p_0=115$; 3, 4 — $p_4/p_0=40$, 1, 2, 3, 4 — $c_4=340$ м/сек

давления на диафрагме в обоих случаях равен 20. Как видно из графика, скорость разрыва Гюгоньо в случае раскрытия диафрагмы 2 в первые 120 мксек превосходит скорость разрыва в случае раскрытия диафрагмы 1. Быстрота изменения площади отверстия dS/dt в указанное время у диафрагмы 2 также значительно больше. Далее, через 180 мксек после начала движения разрыва величина dS/dt и скорость разрыва Гюгоньо в случае диафрагмы 1 превышают соответствующие значения для диафрагмы 2. Можно сказать, что в первые 240 мксек изменение скорости разрыва Гюгоньо следует за изменением величины dS/dt . Отметим, что в случае использования диафрагм 2 наблюдаются заметные колебания скорости разрыва Гюгоньо на участке его замедленного движения. Колебания скорости тем больше, чем меньше перепад давления на диафрагме.

В заключение следует подчеркнуть, что разрыв Гюгоньо образуется через некоторое время τ после появления струи из начального отверстия в диафрагме. В наших опытах это время колеблется от 10 до

100 мксек в зависимости от перепада давления на диафрагме ($p_4/p_0 = 20 \div 230$) и быстроты изменения площади отверстия в ее сечении. С ростом перепада давления время τ уменьшается. К этому же приводит и увеличение быстроты изменения площади отверстия в диафрагме. Время существования разрыва Гюгонио τ_* (время с момента образования разрыва до его распада) оказалось одинаковым для четырехлепестковых и двустворчатых диафрагм. Оно составляет 350—500 мксек

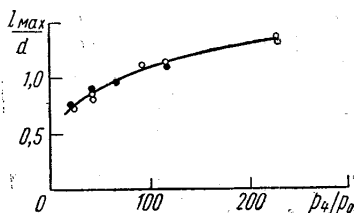


Рис. 4. Расстояние, на котором останавливается скачок уплотнения, при разных перепадах давления на диафрагме. \circ — диафрагма 1; \bullet — диафрагма 2

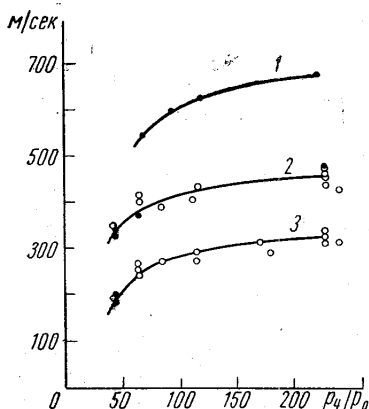


Рис. 5. Скорость возмущений, возникающих после распада скачка уплотнения, для разных перепадов давления на диафрагме. 1 — $c_4 = 640$ м/сек, 2, 3 — $c_4 = 340$ м/сек, \circ — диафрагма 1 \bullet — диафрагма 2

при перепадах давления на диафрагме $p_4/p_0 = 20 \div 230$. С ростом перепада давления величина τ_* падает.

Возникновение разрыва Гюгонио можно объяснить так же, как и образование скачка уплотнения при стационарном истечении газа из отверстия постоянного сечения для перепада давления больше критического. Струя толкающего газа около диафрагмы в начальный период ее раскрытия имеет скорость, близкую к скорости звука, далее струя расширяется, скорость ее становится сверхзвуковой. При этом давление в струе падает ниже дав-

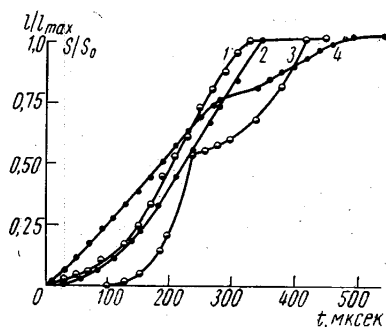


Рис. 6. Относительный путь скачка уплотнения $l(t)/l_{\max}$ и соответствующий ему во времени относительный размер отверстия в диафрагме S/S_0 . 2, 3 — S/S_0 ; 1, 4 — $l(t)/l_{\max}$; 1, 3 — диафрагма 1; 2, 4 — диафрагма 2

ления в канале и возникает скачок уплотнения — разрыв Гюгонио. По мере падения перепада давления между камерой и каналом, разрыв Гюгонио должен двигаться к диафрагме подобно скачку у среза сопла при перепадах давления ниже расчетного. С другой стороны, разрыв Гюгонио все время сносится сверхзвуковой струей газа, вытекающей из камеры в канал. Разрыв останавливается, когда его скорость становится равной скорости струи толкающего газа.

Распад разрыва Гюгонио, по-видимому, связан с тем, что газ за разрывом расширяется и в результате этого с ним взаимодействует волна разрежения, которая движется против потока толкающего газа.

На развертках перед разрывом Гюгонио заметны наклонные линии. Это следы движения возмущений в струе. По углу наклона этих линий к оси времени можно вычислить скорость движения возмущений в газе $u_1 + c_1$. Здесь u_1 и c_1 — скорость потока и скорость звука в газе перед разрывом Гюгонио, соответственно. Величина $u_1 - c_1$ определяется по углу наклона возмущения, образующегося при распаде разрыва и распространяющегося вверх по потоку. По измеренным значениям $u_1 + c_1$ и $u_1 - c_1$ в точке распада разрыва Гюгонио были найдены величины скорости потока u_1 и скорости звука в газе c_1 . По значениям u_1 и c_1 можно оценить число Маха M разрыва Гюгонио непосредственно перед моментом его распада. Число Маха M оказалось равным $2 \div 2,6$ для начального перепада давления на диафрагме $p_4/p_0 = 40 \div 110$ и $c_4 = 340$ м/сек.

Отметим, что разрыв Гюгонио учитывается при расчете течения газа в ударной трубе автором работы [4].

Автор пользуется случаем принести глубокую благодарность научному руководителю профессору А. С. Предводителеву, а также кандидату физ.-мат. наук Ф. В. Шугаеву за ряд ценных советов и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штеменко Л. С. «Вестн. Моск. ун-та, сер. физ., astron.», № 1, 58, 1967.
2. Hugoniot H. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, V CIII, 1886.
3. Чаплыгин С. Д. «О газовых струях». Избранные труды по механике и математике. М., Гостехиздат, 1954.
4. Киреев В. Т. «Изв. АН СССР», механика и машиностр., № 6, 144, 1962.

Поступила в редакцию
17.7 1967 г.

Кафедра
молекулярной физики