

Л. С. ШТЕМЕНКО

ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ВБЛИЗИ ДИАФРАГМЫ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

Получена картина течения газа около диафрагмы в процессе ее раскрытия в ударной трубе. Дается распределение скорости ударной волны по длине ударной трубы для разной быстроты раскрытия диафрагмы в диапазоне чисел Маха от 2,13 до 2,75. Течение газа в ударной трубе является существенно неоднородным и зависит от характера раскрытия диафрагмы.

Введение

Задача об образовании ударной волны в ударной трубе в различной постановке рассматривалась рядом авторов. Еще Гюгонио [1] дал решение задачи об одномерном движении газа в трубе под действием ускоряющегося поршня. Обычно при расчетах потока газа в ударной трубе пользуются идеализированной схемой течения, которая предполагает мгновенное разрушение диафрагмы и одномерный поток газа, отсутствие затухания ударных волн и т. д. В отклонении реального потока от предсказанного идеальной схемой заметную роль играет конечное время раскрытия диафрагмы. По оценке некоторых авторов, наблюдаемые времена раскрытия диафрагмы колеблются от 100 мксек до 1 мсек в зависимости от материала и толщины диафрагмы [2, 3, 5]. Влияние конечного времени раскрытия диафрагмы на скорость ударной волны исследовал Уайт [2]. В работе [4] рассчитана скорость сильных ударных волн при задании определенного закона изменения во времени площади отверстия в сечении диафрагмы. Кемпбелл [5] и др. экспериментально получили закон изменения во времени площади диафрагмы. Однако эти данные у них не связываются с движением ударной волны.

В настоящей работе исследуется влияние времени раскрытия диафрагмы на формирование ударной волны в ударной трубе. Получена картина течения газа около диафрагмы в процессе ее раскрытия, закон изменения во времени площади, открытой для потока в сечении диафрагмы, распределение скорости ударной волны по длине ударной трубы и изучено влияние времени раскрытия диафрагмы на величину максимальной скорости ударной волны и длину зоны формирования.

Измерения относятся к числам Маха ударной волны $M = 2,13 \div 2,75$.

Экспериментальная установка

Эксперименты проведены на ударной трубе прямоугольного сечения размером 34×72 мм. Длина секции высокого давления равнялась 0,35 м, длина секции низкого давления — 1,3 м. В дальнейшем секцию

высокого давления будем называть камерой, а секцию низкого давления — каналом. В рабочую секцию ударной трубы, снабженную оптическими окнами, вставлялась секция диафрагмы. Процесс раскрытия диафрагмы и картина течения газа около нее фотографировались на пленку с помощью теневого прибора ИАБ-451 и фоторегистраторов СФР и ЖФР. Источником света служили лампы ИФП-500 и ДКСШ-1000. Высокое напряжение подавалось на лампы через электрические формирующие линии из $L-C$ -ячеек, что позволило получить импульс света определенной длительности (~ 600 мксек) и исключить таким образом наложение на пленку более поздних стадий процесса течения.

Для измерения скорости ударной волны по длине ударной трубы были изготовлены и смонтированы в нее 9 пьезодатчиков на расстоянии 100 мм друг от друга.

Первый датчик находился на расстоянии 265 мм от плоскости диафрагмы. Сигнал от него запускал импульсный осциллограф ОК-17М, на вход которого подавались сигналы от следующих трех датчиков. Сигнал от пятого датчика запускал второй осциллограф, на вход которого подавались сигналы от остальных четырех датчиков. На осциллограф сигналы поступали через катодный повторитель. Наряду с описанной схемой включения датчиков использовалась и другая схема: сигнал от второго датчика запускал осциллограф ОК-17М, на вход которого подавались сигналы от последующих пяти датчиков. На тот же вход осциллографа поступали сигналы звукового генератора частотой 50 кГц, которые служили метками времени. В одном опыте измерялась пьезодатчиками скорость ударной волны на разных расстояниях от диафрагмы и фотографировался фоторегистратором процесс раскрытия диафрагмы и течение газа около нее.

Процедура опыта была такова: камера наполнялась сжатым газом до давления, близкого к давлению разрыва диафрагмы, после чего диафрагма разрывалась металлическим пробойником. В момент электрического контакта пробойника с диафрагмой на лампу подавался поджигающий импульс через схему синхронизации. В экспериментах использовались диафрагмы из латунной, алюминиевой и медной фольги толщиной 0,1 мм. Чтобы диафрагма раскрывалась в виде лепестков, на нее наносились крестообразные риски при помощи специального проволочного штампа на гидравлическом прессе. Разброс в давлении разрыва не превышал 10%. Давление в камере варьировалось от 3 до 7,5 атм. и измерялось пружинным манометром, давление в канале варьировалось от 1 атм. до 50 мм рт. ст. и измерялось пружинным вакуумметром и масляным манометром. В камере была смесь воздуха с гелием, в канале — воздух.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В опытах получены последовательные кадры и временные развертки течения газа около диафрагмы в ударной трубе.

По разверткам (см. рис. 4) была измерена скорость возмущений. На рис. 1, а зафиксирована картина истечения сжатого газа из камеры в канал при раскрытии диафрагмы. Газ течет слева направо. Время между кадрами 8 мксек. Из этих снимков видно, что в начальный момент раскрытия диафрагмы появляется струя газа из камеры. Струя движется с дозвуковой скоростью тем большей, чем больше перепад давления на диафрагме и скорость звука в камере. С 11-го кадра впереди струи ясно видно возмущение, имеющее форму полусферы. С 12-го кадра и далее видны следующие друг за другом возмущения,

причем последующие возмущения имеют более сложную форму по сравнению с первым. Скорость первого возмущения всегда звуковая по отношению к невозмущенному газу, скорость последующих постепенно

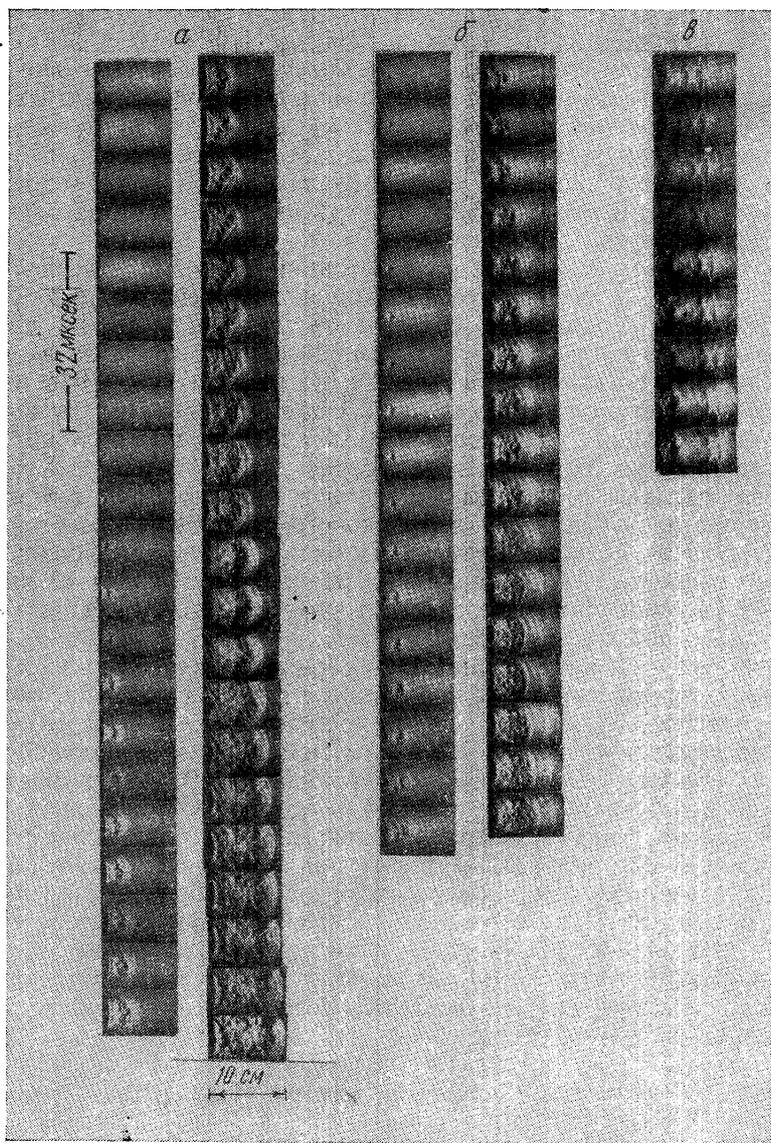


Рис. 1. Последовательные кадры течения газа около диафрагмы в процессе ее раскрытия. *а* — диафрагма раскрывается в виде четырех лепестков ($p=7,5$ атм, $p_0=1$ атм); *б*, *в* — диафрагма раскрывается в виде двух створок ($p=4,5$ атм, $p_0=1$ атм); *а* и *б* — течение газа у самой диафрагмы, *в* — течение газа на расстоянии двух калибров от диафрагмы

увеличивается. Сферический фронт возмущений при их движении становится все более плоским. Через некоторое время возмущения достигают стенок канала и отражаются от них. На последних кадрах видно правильное отражение возмущений от стенок ударной трубы. Инте-

ресно отметить, что возмущения образуются и достигают стенок канала за время, когда диафрагма еще не успела полностью раскрыться.

На рис. 1, б зафиксирован процесс истечения газа из камеры в канал через щелевое отверстие. Диафрагма в этом случае раскрывалась в виде двух прямоугольных створок, а не в виде треугольных лепестков, как на рис. 1, а.

Двигаясь по каналу, возмущения догоняют друг друга и создают более сильные возмущения. Последние в свою очередь и образуют ударную волну. В канале одновременно можно наблюдать возмущения во

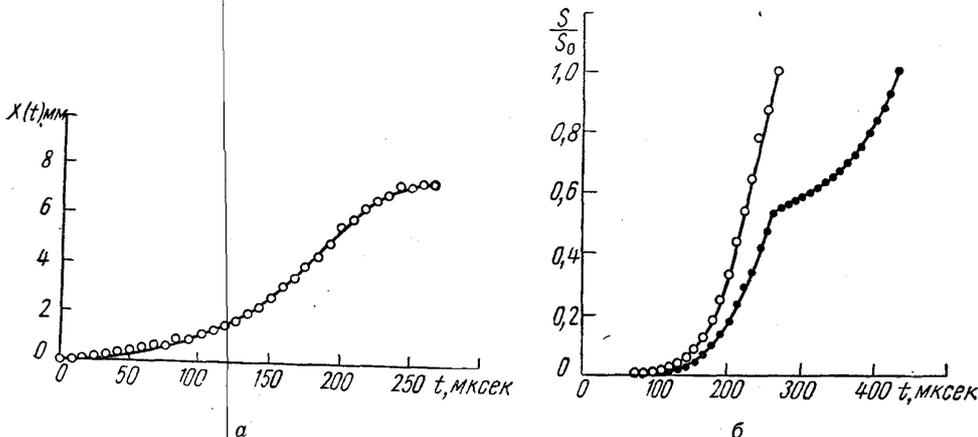


Рис. 2. Кривые, характеризующие изменение во времени площади диафрагмы, открытой для потока. а — движение бокового лепестка, $x(t)$ — проекция ширины лепестка на ось трубы; б — зависимость от времени величины относительного отверстия в диафрагме

всех фазах регулярного и маховского отражения от стенок канала (см. рис. 1, в).

Рассмотрим, как раскрываются лепестки диафрагмы. На кадрах рис. 1 хорошо видно, что сначала образуется небольшое отверстие, из которого вырывается струя сжатого газа, затем начинается движение лепестков. До некоторого момента времени все лепестки движутся вместе, затем боковые быстро достигают своего максимального положения, в то время как верхний и нижний еще продолжают свое движение, запаздывая на 200 мксек. На рис. 2, а приведена зависимость от времени проекции ширины бокового лепестка диафрагмы на ось трубы $x(t)$, полученная по временной развертке процесса раскрытия диафрагмы.

Из зависимости $x(t)$ для лепестков выведен закон изменения во времени площади, открытой для потока в сечении диафрагмы, в таком виде:

$$S(t) = \frac{S_0}{2} \{2 - \sqrt{1 - [x_1(t)/l_1]^2} - \sqrt{1 - [x_2(t)/l_2]^2}\},$$

где S_0 — площадь при полностью открытой диафрагме; $x_1(t)$, $x_2(t)$ — проекции ширины бокового и верхнего лепестков диафрагмы на ось трубы; l_1 и l_2 — ширина бокового и верхнего лепестков.

На рис. 2, б представлен график отношения площади, открытой в данный момент времени, к полной площади $S(t)/S_0$ в зависимости от времени для двух случаев раскрытия диафрагмы. Левый график представляет эту зависимость в случае одновременного движения лепестков диафрагмы (квадратное или круглое сечение ударной трубы), правый —

в случае запаздывания верхнего и нижнего лепестков по отношению к боковым (прямоугольное сечение ударной трубы).

Из графиков видно, что открытая для потока площадь в сечении диафрагмы медленно увеличивается в первое время открытия, а затем быстро достигает своего максимального значения. Так, для одновременного движения лепестков диафрагмы 10% от полной площади достигается за 160 мксек, остальные 90% — за 110 мксек, для неодновременного — за 180 мксек и 260 мксек соответственно.

Рассмотрим теперь скорость ударной волны на разных расстояниях от диафрагмы при полученном законе изменения ее площади во времени.

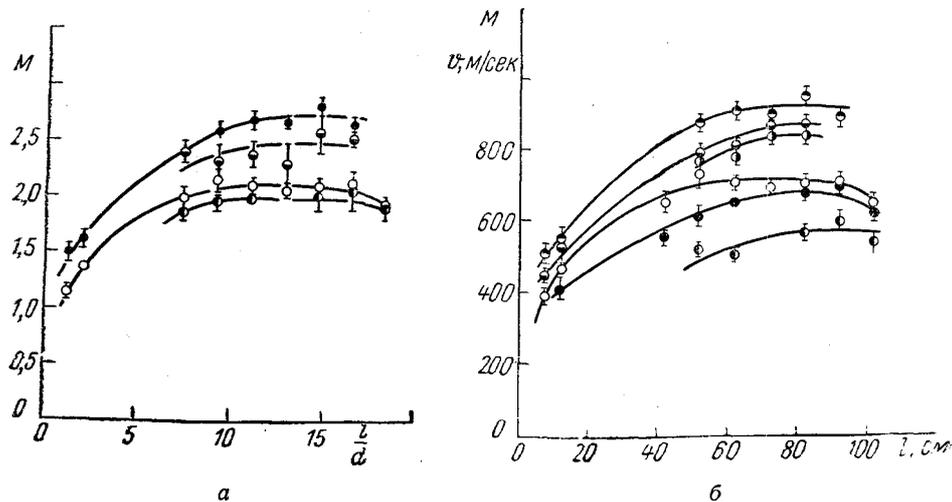


Рис. 3. Скорость ударной волны на разных расстояниях от диафрагмы a :
 ● — $p/p_0=115$, $a=735$ м/сек; ○ — $p/p_0=75$, $a=660$ м/сек; ○ — $p/p_0=45$,
 $a=565$ м/сек; ● — $p/p_0=40$, $a=520$ м/сек; б: ● — $t=540$ мксек, ○ — $t=$
 $=680$ мксек, ● — $t=750$ мксек все при $p/p_0=115$, $a=735$ м/сек; ● — $t=$
 $=680$ мксек, ○ — $t=420$ мксек, ● — $t=750$ мксек все при $p/p_0=45$, $a=$
 $=565$ м/сек

На рис. 3, а представлены кривые распределения скорости ударной волны по длине ударной трубы для разных перепадов давления на диафрагме и скорости звука в камере.

По оси ординат отложено число Маха ударной волны M , по оси абсцисс длина ударной трубы в калибрах l/d , где l — расстояние по оси ударной трубы, d — приведенный диаметр ударной трубы; $d = \sqrt{4S/\pi}$, S — площадь прямоугольного сечения ударной трубы. Первые две точки около диафрагмы измерены по разверткам, остальные — по сигналам от пьезодатчиков. Каждая точка есть среднее из нескольких опытов.

Из графиков видно, что чем слабее ударная волна, тем на меньшем расстоянии от диафрагмы достигает она своей максимальной скорости.

Для изучения влияния времени раскрытия диафрагмы на формирование ударной волны были сняты кривые распределения ее скорости по длине ударной трубы для разных времен раскрытия диафрагмы при одном и том же начальном перепаде давления и скорости звука в камере. Чтобы получить разные времена раскрытия диафрагмы, искусственно замедляли движение ее лепестков: в одном случае перед диафрагмой вставляли свинцовую пластинку толщиной 1 мм, крестообразно прорезанную, в другом — крепили с помощью пружин латунные створки, вырезанные по форме лепестков. Время полного раскрытия диафрагмы

в обоих случаях оказалось практически одинаковым, но характер изменения площади во времени был разный. В первом случае лепестки диафрагмы замедлялись преимущественно в начальной стадии ее раскрытия, а во втором — замедление было в основном во второй стадии.

На рис. 3, б представлены кривые распределения скорости ударной волны по длине трубы для разных времен раскрытия диафрагмы. Кривая о получена при временах раскрытия диафрагмы около $t=420$ мксек, кривая ● — при времени $t=680$ мксек (замедление лепестков во второй стадии раскрытия диафрагмы), кривая ○ — при времени $t=750$ мксек:

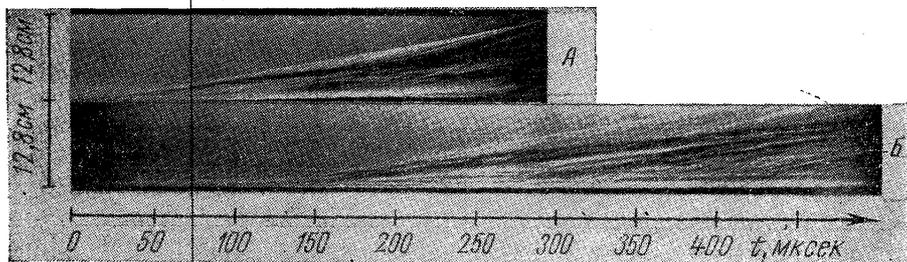


Рис. 4. Временные развертки течения газа около диафрагмы ($p=5,5$ атм, $p_0=100$ мм рт. ст.): А — при обычном раскрытии диафрагмы без дополнительного ее торможения, Б — при искусственном замедлении начальной стадии раскрытия диафрагмы

(замедление лепестков в начальной стадии раскрытия диафрагмы). Все три кривые сняты при перепаде давления на диафрагме $p/p_0=45$ и скорости звука в камере $a=565$ м/сек (p — начальное давление сжатого газа в камере, p_0 — начальное давление газа в канале).

Остальные три кривые сняты при $p/p_0=115$ и $a=735$ м/сек. Кривая ○ получена при временах раскрытия диафрагмы около 540 мксек, кривая ● — при времени $t=680$ мксек (замедление лепестков диафрагмы в начальной стадии ее раскрытия), кривая ○ — при времени $t=750$ мксек (еще более сильное замедление лепестков диафрагмы в начальной стадии ее раскрытия). Кривая распределения скорости ударной волны при замедлении лепестков диафрагмы во второй стадии ее раскрытия практически совпадает с кривой при $t=540$ мксек.

Приведенные графики показывают, что величина максимальной скорости ударной волны зависит, прежде всего, от характера изменения площади в начальной стадии раскрытия диафрагмы. Чем медленнее изменяется площадь в начальной стадии раскрытия диафрагмы, тем меньше величина максимальной скорости ударной волны, больше расстояние ее формирования. Величина этого эффекта зависит от перепада давления на диафрагме и скорости звука в камере. Так, если время замедленного раскрытия диафрагмы увеличивается примерно на 30% по сравнению с временем ее раскрытия без дополнительного торможения, то величина максимальной скорости ударной волны уменьшается на 17% для $p/p_0=55$, $a=590$ м/сек и на 9% для $p/p_0=115$, $a=735$ м/сек по сравнению с такой же величиной при обычном раскрытии диафрагмы без замедления. Замедление лепестков диафрагмы во второй стадии ее раскрытия слабо влияет на величину максимальной скорости ударной волны, несколько увеличивая лишь расстояние ее формирования.

Сравним временные развертки течения газа около диафрагмы в случае ее раскрытия без дополнительного торможения (рис. 4, а) и в случае замедления начальной стадии раскрытия диафрагмы (рис. 4, б) при прочих равных условиях. Развертки показывают, что замедление

начальной стадии раскрытия диафрагмы влияет следующим образом.

Скорость возмущений, следующих друг за другом, уменьшается по сравнению со скоростью возмущений, идущих в том же порядке при обычном раскрытии диафрагмы. Возмущения следуют через больший интервал времени, интенсивность и число их падает.

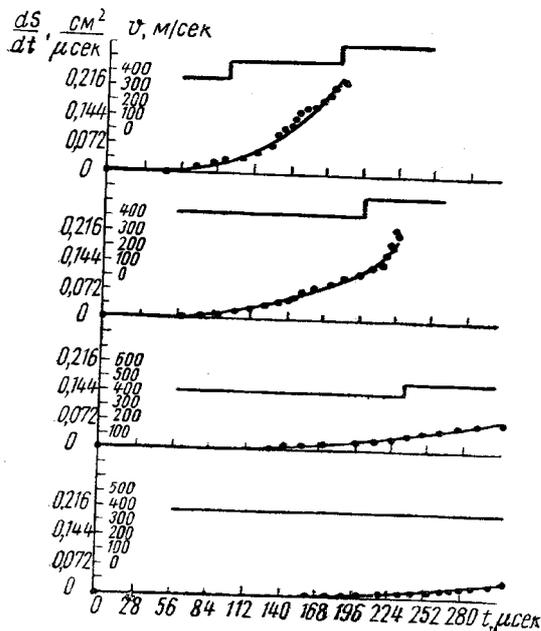


Рис. 5. Изменение во времени скорости возмущения, распространяющегося в покое газе в зависимости от быстроты раскрытия диафрагмы ($p=5,5$ атм, $p_0=50$ мм рт. ст.)

На рис. 5 показано изменение во времени скорости возмущения, распространяющегося в покое газе, при разной быстроте изменения площади в сечении диафрагмы для одних и тех же начальных условий. Резкое изменение скорости возмущения происходит в тот момент, когда последующее возмущение, идущее с большей скоростью, догоняет данное возмущение. Из графика видно, что за одно и то же время с начала раскрытия диафрагмы первое возмущение догоняет тем меньшее число возмущений, чем меньше быстрота изменения площади отверстия в диафрагме. Скорость первого возмущения в момент встречи с догнавшим его возмущением изменяется на тем меньшую величину, чем меньше быстрота изменения площади.

На нижнем графике рис. 5 за время около 300 мксек ни одно из последующих возмущений не догоняет первого. Уменьшение быстроты изменения площади, открытой для потока сжатого газа, ведет к падению градиента давления в сечении диафрагмы, что и вызывает, по-видимому, уменьшение числа возмущений, возникающих в канале, и падение их интенсивности.

Уменьшение же числа возмущений, образующих ударную волну, и падение их интенсивности приводит к уменьшению величины максимальной скорости ударной волны, а увеличение интервала времени между их следованием ведет к возрастанию расстояния, на котором формируется ударная волна.

Автор приносит благодарность проф. А. С. Предводителю, доц. С. И. Грибковой и Ф. В. Шугаеву за ценные советы и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hugoniot H. J. de l'ecole polytechn., 58, 1—125, 1889.
2. White D. R. J. Fluid Mech., 4, No. 6, 585—599, 1958.
3. Glass I., Patterson G. N. J. Aeronaut. Sci., 22, No. 2, 73—100, 1953.
4. Киреев В. Т. «Изв. АН СССР», механ. и машиностр., № 6, 144, 1962.
5. Campbell G. A., Kimber G. M., Napier D. H. J. Scient. Instr., 42, No. 6, 381—384, 1965.

Поступила в редакцию
10.8 1965 г.

Кафедра
молекулярной физики