

2. Иванов А. В. Экспериментальное определение распределения плотности перед затупленными телами, обтекаемыми сверхзвуковым потоком разреженного газа. ПМТФ, 1964, № 6, стр. 99.
3. Иванов А. В. Структура ударной волны в воздухе при числах M от 2,6 до 6. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 1.
4. Linzer M., Horning D. F. Structure of Shock Fronts in Argon and Nitrogen. Phys. Fluids, 1963, vol. 6, No. 12, p. 1661.
5. Robben F., Talbot L. Measurement of Shock Wave Thickness by the Electron Beam Fluorescence Method. Phys. Fluids, 1966, vol. 9, No. 4, p. 633.
6. Probstein R. F. Continuum Theory and Rarefied Hypersonic Aerodynamics. Rarefied Gas Dynamics. 1960, p. 416 (Proc. of the First Intern. Symposium Held at Nice).
7. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. Изд. иностр. лит., стр. 416, 868.
8. Сухнев В. А. Об определении поправок к показаниям насадков полного напора в сверхзвуковом потоке разреженного газа. Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1964, № 5, стр. 161.
9. Sherman P. M. Visualization of Low Density Flow by Means of Oxygen Absorption of Ultraviolet Radiation. J. Aeronaut. Sci., 1957, vol. 24, No. 2, p. 93.
10. Физические измерения в газовой динамике и при горении. Под ред. Ладенбурга Р., Льюиса В., Пирса Р. Изд. иностр. лит., 1957.
11. Коган М. Н. О гиперзвуковых течениях разреженного газа. ПММ, 1962, т. 26, вып. 3, стр. 520.
12. Авдеевский В. С., Копятевич Р. М. Расчет ламинарного пограничного слоя в сжимаемом газе при наличии теплообмена и произвольном распределении давления вдоль поверхности. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1960, № 1.

ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УДАРНЫХ ВОЛН, УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОСЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ В ВИДЕ КАНАЛОВ-ДИАФРАГМ

А. В. БОНДАРЕНКО, М. А. ИБРАГИМ

(Москва)

Приводим некоторые результаты экспериментального исследования поведения плоских ударных волн значительной интенсивности после встречи их с твердыми препятствиями в виде перегородок, расположенных перпендикулярно движению волн и снабженных короткими сквозными каналами (диафрагмами). Прохождение ударных волн через такие каналы-диафрагмы представляет собой довольно сложный и малоизученный процесс, небезынтесный по своим результатам также и в практическом отношении.

Поставленная задача относится к проблеме движения ударных волн в каналах переменного сечения с непрерывным или скачкообразным изменением их поперечного сечения. Разновидностью этой задачи является прохождение ударных волн через щели, решетки, сетки и т. п. Эксперименты по взаимодействию плоских ударных волн с препятствиями подобного типа описаны в немногих публикациях и, как правило, — в виде качественных наблюдений. В [1, 2] получены моментальные теневые снимки прохождения слабых ударных волн через проволочную сетку и перфорированную пластинку с прозрачностью 0,5 и 0,75 соответственно. Методом непрерывной фоторазвертки наблюдалась шпирная картина взаимодействия плоских волн с решетками [3] и сетками [4]. Весьма показательные теневые моментальные снимки прохождения слабых ударных волн через плоскую щель приведены в [5].

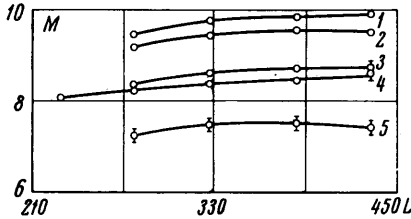
Теоретический анализ явления движения ударных волн в каналах переменного сечения затруднителен. Попытки получения аналитического решения задачи предпринимались например, в [6-9], при различных упрощающих предположениях: линеаризация, изэнтропичность течения, малая расходимость канала или, наоборот, разрывное изменение площади его сечения и т. п.; при этом рассматривался преимущественно установившийся режим течения до и после участка переменного сечения канала.

Аппроксимация такого участка скачкообразным расширением или сужением (разрывом сечения) позволяет описать и с некоторым приближением рассчитать параметры установившегося течения и в случае сильных ударных волн [8, 9]. Подобные методы расчета, по-видимому, не применялись к сужениям малой протяженности (диафрагмам), по обе стороны которых сечение канала одно и то же.

Экспериментальный подход к данной конкретной задаче, как и теоретический, может быть расчленен: 1) на определение и сопоставление параметров практически установившегося течения перед и за препятствием (вдали от него), 2) на исследова-

ние деталей нестационарного режима течения в непосредственной близости к препятствию, включая переход к установившемуся состоянию. В работе осуществлены обе возможности. Ниже изложены результаты первой части исследования. Здесь методом датчиков на нескольких участках измерялась лишь скорость ударных волн до и (на значительном расстоянии) после препятствий.

Описание эксперимента. Измерения проводились на металлической секционной ударной трубе круглого поперечного сечения внутренним диаметром 100 мм и общей длиной 573 см. Камера высокого давления была снабжена пружинным устройством для разрывания диафрагмы из медной фольги. Камера низкого давления длиной около 458 см состояла из нескольких взаимозаменяемых секций, ряд которых был снабжен ионизационными датчиками для измерения средней скорости ударных волн. Измерения производились одновременно на четырех участках ударной трубы, середины которых находились на расстояниях 277, 327, 384 и 433 см от диафрагмы. Для фиксации сигналов датчиков применялась схема из нескольких осциллографов ОК-17М, работавших в режиме ждущей развертки и запускавшихся импульсом от датчика, расположенного вверх по ходу ударной волны. На тот же луч каждого из осциллографов подавалась синусоида от ГСС частотой 100 кГц. При больших скоростях ударных волн можно было на одном осциллографе фиксировать импульс от трех датчиков и ограничиться для измерений схемой только из двух осциллографов.



Фиг. 1

Препятствия-диафрагмы представляли собой металлические диски толщиной 10 мм с различным количеством отверстий (цилиндрических каналов) того или иного диаметра. Одиночные отверстия в центре дисков отличались диаметрами 70, 60, 50, 40, 30, 20 мм. Безразмерной характеристикой подобных препятствий могут служить или коэффициент сплошности G (отношение площади сплошной части препятствия S к его общей площади S_0 , т. е. к сечению трубы) или коэффициент прозрачности $F = 1 - G$. Прозрачность препятствий с одиночными отверстиями была 0.49, 0.36, 0.25, 0.16, 0.09 и 0.04 соответственно. Другие препятствия имели по 3, 7, 14, 38 отверстий различного диаметра, сумма площадей которых равнялась площади одиночного отверстия диаметром 50 или 30 мм, т. е. их прозрачность была 0,25 и 0,09. Препятствия укреплялись между секциями на расстоянии 218 см от диафрагмы.

В качестве толкающего газа использовался H_2 , исследуемым газом служил воздух, пропускавшийся по пути в камеру низкого давления через «ловушку» с жидким азотом для очистки от летучих примесей. Перед измерениями камера несколько раз промывалась очищенным воздухом с откачкой до $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Начальное рабочее давление воздуха p_1 выбиралось равным 0.4 и 0.8 мм рт. ст. и измерялось дифференциальным масляным манометром. Давление толкающего газа p_4 было 2, 3, 6, 9 атм. Это позволяло получать ударные волны с измеренной интенсивностью от 7 до 10 М. Отклонения отдельных измерений скорости ударных волн от усредненных по нескольким опытам при одинаковых начальных условиях составляли от 2 до 5%.

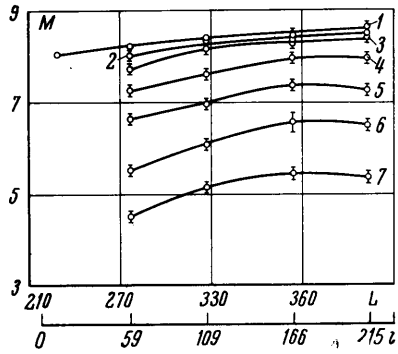
Результаты измерений. Проведенные эксперименты состояли из четырех различных серий. Сначала было найдено распределение скорости ударных волн вдоль тру-

бы в отсутствие препятствий. На фиг. 1 изображены кривые распределения для различных начальных условий. Видно, что на расстоянии $L = 229-433$ см от диафрагмы скорость ударных волн уже мало изменяется (на 3-5%). Максимальная их скорость достигается на расстоянии около 40 диаметров трубы. Максимальное экспериментальное число M_0 ниже расчетного по идеальной теории ударной трубы на 12-19%, т. е. наблюдаемое

различие несколько больше обычного. Следует отметить, что кривые 3 и 4, несмотря на одинаковую величину отношения p_4/p_1 , заметно смещены одна относительно другой. По-видимому, здесь сказывается различие в величине начального давления p_1 . Для более высокого p_1 измеренное значение ближе к расчетному. Как показано в [10], при понижении начального давления исследуемого газа до нескольких долей мм рт. ст. наблюдаются значительные отклонения экспериментальных характеристик ударных волн от расчетов по идеальной теории. В таблице приводятся цифровые экспериментальные значения чисел Маха M для различных расстояний L от диафрагмы.

Кривые	P_4 , атм.	P_1 мм. рт. ст.	L , см				
			229	277	327	384	433
1	9	0.4	—	9.4	9.7	9.8	9.9
2	6	0.4	—	9.2	9.4	9.5	9.5
3	6	0.8	—	8.4	8.6	8.7	8.6
4	3	0.4	8,1	8.2	8.4	8.5	8.6
5	2	0.4	—	7.2	7.5	7.5	7.4

Во второй серии опытов измерялась скорость ударной волны после ее прохождения через одиночное отверстие различного диаметра d . Интенсивность исходной ударной волны была одной и той же: $M_0 \approx 8.5$ ($p_1 = 0.4$ мм рт. ст.). Скорость измерялась на четырех участках после препятствия на расстоянии $l = 59, 109, 166$ и 215 см от него. Фиг. 2 показывает соответствующие распределения скорости прошедшей волны. Видно, что форма кривых для препятствий различной прозрачности остается почти неизменной. Сразу за препятствием скорость ударных волн, по-видимому, резко уменьшается, а затем возрастает до некоторого предельного значения M_1 . Наличие препятствий не смещает максимума кривых распределения, который находится на расстоянии около 17 диаметров трубы от препятствия. С уменьшением диаметра отверстий, установившаяся скорость ударных волн уменьшается сначала медленно, а затем быстрее. В таблице приводятся цифровые экспериментальные значения чисел Маха M прошедшей ударной волны для различных расстояний l от препятствия и различного диаметра отверстий d .



Фиг. 2

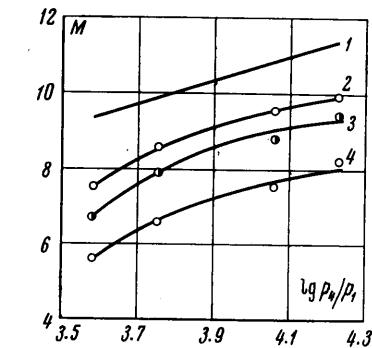
На фиг. 3 отложена величина отношения скорости после препятствия к скорости без препятствия в зависимости от коэффициента прозрачности. Кривая 1 относится к установившимся (максимальным) значениям скорости M_1 и M_0 , кривая 2 — к значениям скорости на ближайшем к препятствию участке ($l = 59$ см и $L = 277$ см). Видно, что при прохождении ударных волн

через отверстия диаметром 20—30 мм ($F = 0.04—0.09$) их скорость уменьшается на 40—25%. Но в общем воздействие таких препятствий не очень велико. Если их прозрачность выше 0.5, скорость ударных волн почти не изменяется.

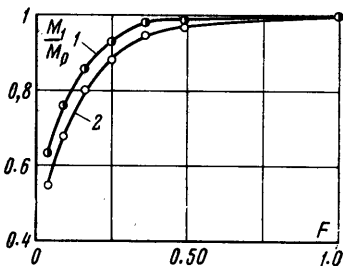
Для двух размеров отверстий ($d = 30$ мм, $F = 0.09$ и $d = 50$ мм, $F = 0.25$) было исследовано прохождение ударных волн различной интенсивности (четыре значения от 7.5 до 9.85 M). Во всех случаях распределение скорости прошедших волн вдоль трубы имело один и тот же вид. На фиг. 4 приведена зависимость установившейся скорости

Кривые	d , мм	F	l , см			
			59	109	166	215
1	100	1.0	8.2	8.4	8.5	8.6
2	70	0.49	8.0	8.4	8.3	8.5
3	60	0.36	7.7	8.2	8.4	8.4
4	50	0.25	7.3	7.6	7.9	8.0
5	40	0.16	6.6	6.9	7.4	7.3
6	30	0.09	5.5	6.1	6.6	6.5
7	20	0.04	4.5	5.1	5.5	5.4

зависимость установившейся скорости M_1 от логарифма отношения давлений на диафрагме ($p_1 = 0.4$ мм рт. ст.) для двух препятствий: $F = 0.09$ — кривая 4 и $F = 0.25$ — кривая 3; а также зависимость для M_0 (в отсутствие препятствия) — кривая 2. Там же имеется расчетная



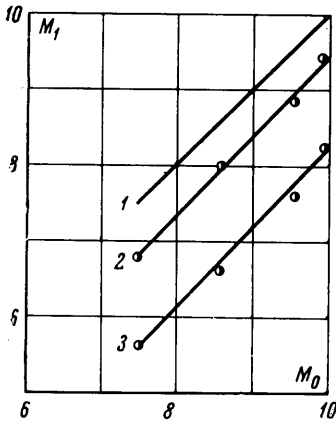
Фиг. 4



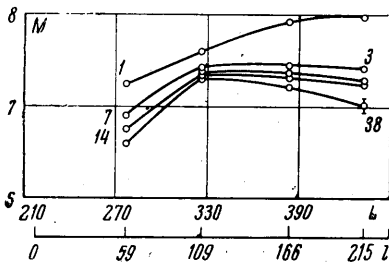
Фиг. 3

кривая 1, построенная по известной формуле для ударной трубы и в указанном интервале значений p_2/p_1 представляемая прямолинейным отрезком. Для более слабых ударных волн относительное различие между расчетными и измеренными скоростями

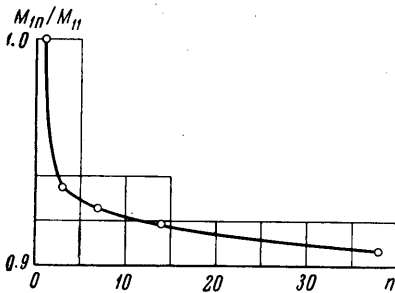
ми было больше. Значения M_1 , отложенные в зависимости от максимальной интенсивности M_0 падающих на препятствия ударных волн, показали линейный ход (фиг. 5) с одинаковым угловым коэффициентом для обоих препятствий (линия 3 — $F = 0.09$, линия 2 — $F = 0.25$), но с относительным смещением линий на некоторую величину. Их наклон оказался близким к наклону условной зависимости M_0 от M_0 в отсутствие препятствия (45°) — линия 1.



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

0.5, достигает практически начального значения и несколько снижается лишь при $F < 0.2$. Прямая пропорциональность между интенсивностью прошедших ударных волн и площадью отверстий отсутствует, степень ослабления оказывается значительно меньшей степени уменьшения площади (нелинейный эффект). Ослабление ударных волн при помощи препятствий-диафрагм достигается главным образом уменьшением их прозрачности и в небольшой степени — дроблением отверстий. Относительно меньшее ослабление наблюдается для более сильных ударных волн.

Авторы благодарят А. С. Предводителя за интерес к работе и ценные советы.

В последней серии опытов исследовалось влияние дробления отверстий в препятствиях на более мелкие, без изменения суммарной их площади, т.е. при сохранении величины прозрачности F . Интенсивность исходной ударной волны была одной и той же ($M_0 \approx 8.5$) при $p_1 = 0.4$ мм рт. ст. Количество отверстий n для препятствия с $F = 0.09$ было 1, 7, 14, а их диаметры соответственно 30, 11.3 и 8 мм. Для препятствия с $F = 0.25$ количество отверстий n было равно 1, 3, 7, 14, 38, а диаметры соответственно 50, 29, 19, 13.5 и 8 мм. Отверстия располагались симметрично относительно центра препятствий. На фиг. 6 показано распределение скорости прошедших ударных волн для препятствия с $F = 0.25$. Цифры у кривых означают количество отверстий в препятствии. Для препятствия с $F = 0.09$ картина была однотипной. Видно, что дробление отверстий уменьшает скорость прошедших волн, хотя и не очень значительно. Ударные волны после прохождения препятствия с несколькими отверстиями достигают своей максимальной скорости раньше, чем в случае препятствия с одним отверстием той же площади. График отношения максимальных скоростей прошедших волн M_{1n} к скорости для одиночного отверстия M_{11} в зависимости от количества отверстий (фиг. 7), показывает, что при увеличении n от 1 до 7 скорость довольно резко, хотя и не на много ($\sim 7\%$) уменьшается, а затем стремится к пределу, равному $\sim 90\%$ от скорости для одиночного отверстия.

Некоторые выводы. Обычно при прохождении ударной волны через разрывное сечение канала с расширением происходит ослабление ее и, наоборот, — усиление, если канал с сужением (не слишком значительным). В нашем случае при прохождении ударных волн через короткий канал-диафрагму превалирует фактор ослабления, так как установившаяся скорость прошедших волн была меньше, чем в отсутствие препятствия. Между этими скоростями в некотором интервале их значений существует линейная связь с угловым коэффициентом, не зависящим от прозрачности препятствия.

Скорость прошедших ударных волн стабилизируется на расстоянии менее 20 диаметров трубы от препятствия, независимо от размеров одиночного отверстия в нем и начальной интенсивности волны. Дробление отверстий ускоряет стабилизацию. Установившаяся скорость после препятствия с прозрачностью, равной или большей

ЛИТЕРАТУРА

1. B o w n a n J., N i b l e t t G. The Passage of a Plane Shock Wave through a Wire Gauze, Proc. Phys. Soc. B. 1955, vol. 68, No. 12.
2. D o s a n j h D. S. Some Comments on «A Theoretical and Experimental Study of Shock Tube Flows». J. Aeronaut. Sci., 1955, vol. 22, No. 11.
3. G l a s s I. I., P a t t e r s o n G. H. A Theoretical and Experimental Study of Shock Tube Flows, J. Aeronaut. Sci., 1955, vol. 22, No. 2 (перев.: Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1956, № 2).
4. F r a n k s W. J., H a l l J. G., Collision of Plane Shock Wave with Wire Screens. J. Aeronaut. Sci., 1957, vol. 24, No. 12.
5. S c h a r d i n H. Ein Beispiel zur Verwendung des Stosswellenrohres für Probleme der Instationären Gasdynamik. Z. angew. Math. und Phys. 1958, B. 9, No. 5/6 (перев.: Сб. статей «Ударные трубы». Изд. иностр. лит., 1962).
6. C h e s t e r W. The Propagation of Shock Waves through Channels of Varying Width, Quart. J. Mech. and Appl. Math., 1953, vol. 6, No. 4 (перев.: Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1954, № 6).
7. C h i s n e l l R. F. The Motion of Shock Waves in a Channel with Applications to cylindrical and spherical Shock Waves. J. Fluid Mech., 1957, vol. 2, No. 3.
8. K a h a n e A., W a r r e n W. R., G r i f f i t h W. C., M a r i n o A. A. A Theoretical and Experimental Study of Finite Amplitude Wave Interactions with Channels of Varying Area. J. Aeronaut. Sci., 1954, vol. 21, N 8 (перев.: Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1955, № 4).
9. R u d i n g e r G. Wave Diagrams for Non-Steady Flows in Ducts, Princeton, 1955.
10. D u f f R. E. Shock-Tube Performance of Low Initial Pressure. Phys. Fluids, 1959, vol. 2, No. 2.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРЯМЫХ К РАСЧЕТУ ОБТЕКАНИЯ КОНИЧЕСКИХ
ТЕЛ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ АТАКИ**

А. П. БАЗЖИН, И. Ф. ЧЕЛЫШЕВА

(Москва)

1. В статье рассматривается обтекание конических тел с гладким контуром поперечного сечения под большими углами атаки.

Изучение полей течения около круговых конусов, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа под углами атаки [1], а также общие физические соображения приводят к выводу, что весьма вероятно следующая схема течения. При достаточно большом угле атаки течение на нижней стороне конического тела не будет испытывать влияния верхней стороны, так как по мере увеличения угла атаки область гиперболичности распространится на все расстояние от скачка уплотнения до тела. В таком случае течение около нижней части тела можно рассчитывать независимо, применив для этого один из методов расчета смешанных течений газа.

Был выбран метод, предложенный в работе [2]. Этот метод широко применялся для расчета симметричного обтекания затупленных плоских и осесимметричных тел, а также был использован для расчета пространственных смешанных течений газа около лобовых поверхностей тел под углами атаки. Достоинства и слабые стороны этого метода хорошо известны. Применение его к расчету конических течений производится, по-видимому, впервые.

Кроме этого метода авторам известен лишь один метод расчета поля течения около конусов при больших углах атаки. Это обратный метод, аналогичный широко известному методу Ван Дайка. В работе [3] дано его краткое описание и приведены примеры расчетов и экспериментальные данные, на основании которых производится оценка точности метода.

Выбранный метод расчета хорошо соответствует природе конического течения, в котором вблизи поверхности тела может образоваться вихревой слой с большими градиентами газодинамических величин по нормали к поверхности. Программа для ЭВМ, составленная на основе этого метода, позволяет рассчитать течение около нижней поверхности конического тела с гладким контуром поперечного сечения.

В статье представлены отдельные результаты систематических расчетов обтекания круговых и эллиптических конусов при больших углах атаки.