

Здесь  $p_\infty$  и  $v_\infty$  — давление и скорость в бесконечно удаленной точке течения,  $\rho$  — плотность жидкости.

Известно [7-9], что решение поставленной задачи с конечной однолистной застойной областью при  $Q \geq 0$ , т. е. при  $p_\infty f \geq k$ , не существует; решение же задачи при  $Q < 0$ , т. е. при  $p_\infty f < k$ , существует всегда, причем застойная зона имеет вид заостренной спереди, вогнутой области, контур которой касается обтекаемого тела. Отметим, что обычно реализуется, как правило, второй случай, когда  $p_\infty f < k$ .

Впервые обтекание с заостренной каверной перед пластинкой (и бесконечной областью постоянного давления за пластинкой) было рассмотрено С. А. Чаплыгиным [1]. Им же была решена задача об обтекании клина с заостренной каверной за клином [2]. Кольшер решил задачу об обтекании пластинки с образованием застойной зоны позади пластинки [3]. Аллен рассмотрел задачу об ударе струи о плоскость с образованием застойной зоны [5]. Саусвелл и Вази релаксационным методом построили серию течений при  $Q < 0$  за круглым цилиндром и за сферой [6]. Физическая интерпретация этих результатов была довольно неопределенной; между тем, из изложенного ранее следует, что построенные заостренные каверны можно рассматривать в указанной постановке как застойные зоны, заполненные твердыми частицами. По-видимому, вообще, решения с застойной областью перед движущимся телом являются неустойчивыми; однако при наличии некоторых стабилизирующих обстоятельств (например, игла впереди круглого диска при сверхзвуковом обтекании [7] или твердые частицы, распыленные в потоке, как здесь) эти решения можно наблюдать в реальных условиях.

Поступила 26 VIII 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чаплыгин С. А. К вопросу о струях в несжимаемой жидкости. Тр. Отд. физ. наук Об-ва любителей естеств. наук, 1899, т. 10, вып. 1, см. также Собр. соч., т. II, 1950.
2. Чаплыгин С. А. Собр. соч., т. III, 1950 (статья Гуревича М. И. и Сретенского Л. Н. «О работах С. А. Чаплыгина по гидродинамике»).
3. K o l s c h e r M. Unstetige Strömungen mit Endlichem Totwasser. Luftfahrt-Forschung, 1940, XVII, No 5, 154—160.
4. L i g h t h i l l M. I. A note on cusped cavities. Aer. Res. Council Repts. and Mem., 1945, 2328.
5. A l l e n D. N. The formation of closed wakes in fluid motions. Quart. J. Mech. Appl. Math., 1949, vol. 2, p. 1.
6. S o u t h w e l l R., V a i s e y G. Fluid Motions Characterized by Free Streamlines. Philos. Trans., 1946, 240, 117—161.
7. Б и р к г о ф Г. Гидродинамика. Пер. с англ., ИЛ, 1954.
8. Г у р е в и ч М. И. Теория струй идеальной жидкости. Физматгиз, 1961.
9. С е д о в Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. Гостехиздат, 1950.

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА С ПРЕПЯТСТВИЕМ

Ф. В. Шугаев (Москва)

Взаимодействию ударных волн с плоскими и осесимметричными препятствиями посвящен ряд работ. Брайсон и Гросс [1] экспериментально исследовали при числах  $M_\infty$  от 2.8 до 4.4 дифракцию ударной волны на телах различной формы (конус; цилиндр, ось которого направлена поперек потока; сфера). Ими приведены данные о движении тройной точки, о форме дифрагированной волны. Русанов [2] рассмотрел несколько случаев нестационарного движения ударных волн, в частности, рассчитал взаимодействие ударной волны с цилиндром, находящимся в круглой трубе, когда отношение радиусов цилиндра и трубы равно  $\sim 1.7$ , при  $\gamma = 5/3$  и  $M_\infty = \infty$ . Вычисления проведены при помощи сеток методом «сквозного счета», который позволяет производить расчеты, не обращая внимания на разрывы. Разрывам соответствуют места с резким изменением физических параметров.

Ниже исследовалось движение ударной волны, возникающей при взаимодействии сверхзвукового потока в ударной трубе с препятствием, в интервале чисел  $M$  потока от 1.15 до 1.65. Приводится зависимость скорости ударной волны от времени. Измерена величина промежутка, характеризующего переход от неустановившегося течения к установившемуся.

Опыты проведены в ударной трубе квадратного сечения площадью 8.1 см<sup>2</sup>. Длина камеры низкого давления составляла 1820 мм, камеры высокого давления — 450 мм.

В конструктивном оформлении труба состояла из отдельных секций длиной в 150 мм. Камера высокого давления при помощи медного трубопровода и редуктора присоединялась к баллону со сжатым газом. В качестве рабочего газа использовался

воздух, в качестве толкающего — азот и гелий. Камера низкого давления оканчивалась гасящим баком, который был присоединен к форвакуумному насосу типа ВН-1. Давление в разгоняемой секции менялось от нескольких мм до 300 мм рт. ст. Рабочая часть трубы находилась на расстоянии 1550 мм от диафрагмы. В рабочую часть заподлицо с внутренними стенками трубы были вставлены оптические стекла, которые изолировались от поверхности металла листовым фторопластом толщиной в 0,1 мм, чтобы предотвратить их разрушение при прохождении ударной волны.

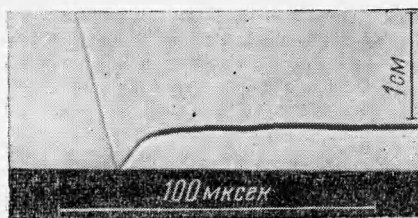
Ударная труба крепилась на координатных столиках, позволявших производить поворот и перемещение трубы. Рабочая секция располагалась между коллиматорной и наблюдательной трубами теневого прибора ИАБ-451. В рабочей части трубы располагалась модель — цилиндр диаметром в 6,8 мм.

Регистрация процесса производилась при помощи сверхскоростного фоторегистратора СФР-2 и ждущего фоторегистратора ЖФР. В качестве источника света использовалась лампа ИФП-4500 либо ИСШ-500. Питание лампы осуществлялось от высоковольтного выпрямителя. Поджигающий импульс на лампу подавался со вторичной обмотки импульсного трансформатора, первичная обмотка которого была связана со ждущим мультивибратором. Синхронизация процесса вспышки лампы с моментом прохождения ударной волны через рабочую секцию осуществлялась следующим образом. Перед рабочей секцией в трубе находился датчик, состоявший из двух изолированных вводов, соединенных полоской фольги. При прохождении ударной волны фольга разрывалась, вследствие чего запускался

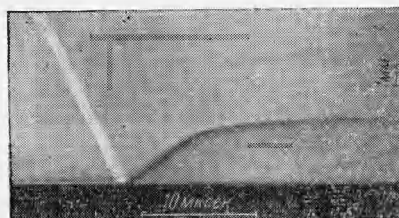


Фиг. 1

При прохождении ударной волны фольга разрывалась, вследствие чего запускался



Фиг. 2



Фиг. 3

тиратронный генератор, с которого поступал импульс на мультивибратор. При съемках использовался как чисто теневой метод (полностью выведенный нож теневого прибора), так и шпирный метод. В первом случае фоторегистратор наводился на плоскость на расстоянии 300 мм от оси трубы.

Результаты, приводимые ниже, относятся к потоку между ударной волной и контактной поверхностью. Пусть в ударной трубе распространяется ударная волна. Тогда между волной и контактной поверхностью существует область однородного течения, число  $M$  которого в системе координат, неподвижной относительно трубы, равно

$$M = \frac{1 - a_{\infty} (\gamma - 1) / (\gamma + 1)}{\sqrt{1/2 (\gamma - 1) a_{\infty} [1 - a_{\infty} (\gamma - 1)^2 / (\gamma + 1)^2]}} \quad \left( a_{\infty} = 1 + \frac{2}{\gamma - 1} \frac{1}{M_{\infty}^2} \right)$$

Здесь  $M_{\infty}$  — число Маха падающей ударной волны.

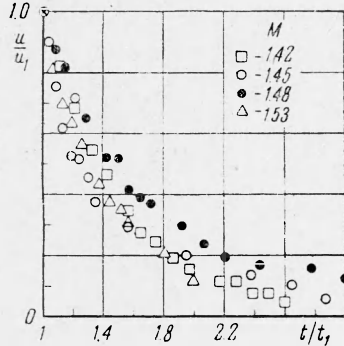
Были проведены опыты при числах  $M_{\infty}$  от 2,4 до 4,9. Это соответствует изменению числа  $M$  за ударной волной в пределах от 1,15 до 1,65. Верхний предел чисел  $M_{\infty}$  определялся прочностными характеристиками трубы. Что касается нижнего предела, то он был выбран таким образом, чтобы стенки трубы вносили минимальные искажения в картину течения. Как известно, влияние стенок особенно значительно при околозвуковых числах  $M$ . На фиг. 1 приведен ряд последовательных кадров движения падающей и отраженной ударной волны. На фиг. 2 и 3 даны развертки процесса, осуществленные через щель шириной в 0,1 мм.

В результате обтекания цилиндра сверхзвуковым потоком возникает отраженная ударная волна. С ней взаимодействует волна разрежения, распространяющаяся от края цилиндра. Вследствие этого скорость ударной волны уменьшается, стремясь к нулю. По прошествии некоторого промежутка времени ударная волна становится неподвижной относительно цилиндра. Это соответствует стационарному обтеканию цилиндра, сверхзвуковым потоком с отошедшей ударной волной. Иногда ударная волна совершает небольшие колебания около положения равновесия. Величина отхода ударной волны от модели  $D$  в пределах ошибок опыта согласуется со значениями других ав-

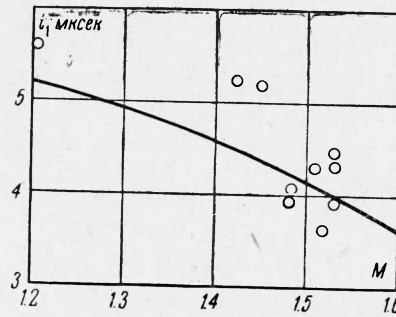
торов [3,4]. Для расчета  $D$  при  $\gamma = 1.4$  можно пользоваться формулой [5]

$$D/r = 0.659 (k-1)^{-2/3} [1 + 0.613 (k-1)^{0.307}] \quad (k = 6/a) \quad (1)$$

Здесь  $r$  — радиус цилиндра. Зависимость скорости отраженной волны  $u$  от времени для нескольких чисел  $M$  показана



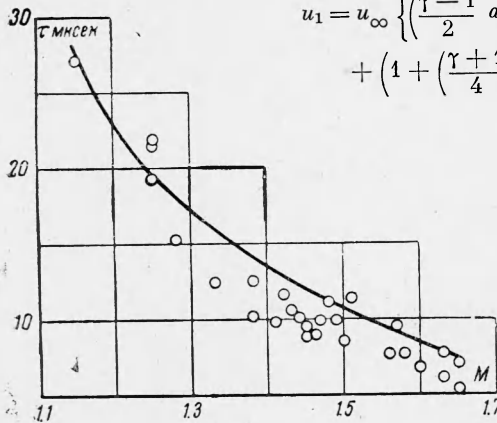
Фиг. 4



Фиг. 5

на фиг. 4. При  $t \leq t_1$  скорость отраженной волны постоянна и совпадает по величине в пределах ошибки опытов со скоростью  $u_1$  волны, отраженной от плоской стенки

$$u_1 = u_\infty \left\{ \left( \frac{\gamma-1}{2} a_\infty \left[ 1 - \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^2 a_\infty \right] \right)^{1/2} \left[ \frac{\gamma+1}{4} M + \left( 1 + \left( \frac{\gamma+1}{4} \right)^2 M^2 \right)^{1/2} \right] - \left( 1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} a_\infty \right) \right\} \quad (2)$$



Фиг. 6

где  $u_\infty$  — скорость падающей ударной волны. Величина  $t_1$  есть время, в течение которого волна разрежения догоняет ударную волну. На фиг. 5 экспериментальные значения  $t_1$  сравниваются с расчетными.

Из опытов был найден также промежуток  $\tau$ , характеризующий переход от неустановившегося течения к установившемуся. Он был определен как время, за которое ударная волна отходит от модели на расстояние, равное  $0.9 D$ . Обработка опытных данных показывает, что величина  $C = u_1 \tau / 0.9 D$  в указанном интервале чисел  $M$  приблизительно

постоянна и равна 1.46. На фиг. 6 приводятся экспериментальные значения величины  $\tau$ . Для сравнения сплошной линией нанесена кривая  $\tau = 1.46 \times 0.9 D / u_1$ , причем величина  $D$  вычислялась по формуле (1), а  $u_1$  — по формуле (2). Некоторое расхождение между экспериментальными точками и расчетной кривой объясняется небольшим отклонением значений  $D$ , найденных из опытов, от значений, вычисленных по формуле (1).

В заключение приношу благодарность А. С. Предводителеву за ценные указания и постоянный интерес к работе.

Поступила 7 V 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Bryson A. E., Gross R. W. F. Diffraction of strong shocks by cones, cylinders and spheres. J. Fluid Mech., 1961, vol. 10, part. 1.
2. Русанов В. В. Расчет взаимодействия нестационарных ударных волн с препятствиями. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, № 2.
3. Wright R. H., Ritchie V. S., Pearson A. O. Characteristics of the Langley 8-foot transonic tunnel with slotted test section. NACA Report, 1958, 1389.
4. Serbin H. Supersonic flow around blunt bodies. JAS, 1958, vol. 25, No. 1.
5. Шугаев Ф. В. Цилиндр с плоским торцом в сверхзвуковом потоке идеального газа. Инж. журн. Ин-та механики, 1963, т. 3, № 3.