

УДК 533.6.011.72

© 1991 г.

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СХОДЯЩИХСЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ОСТРЫМ И ПРИТУПЛЕННЫМ КОНУСАМИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

В последнее время появился ряд работ по исследованию сходящихся ударных волн [1–4] в связи с интересом к кумулятивным эффектам, возникающим при их взаимодействии. Из экспериментов хорошо известны давние (проведенные еще в 40–50-е годы) исследования сходящихся плоских ударных волн, возникающих при различных режимах течения в сверхзвуковых аэродинамических трубах с плоскими соплами [5, 6]. Осесимметричные сходящиеся ударные волны наблюдались в экспериментах при истечении нерасчетных сверхзвуковых струй, истекающих из осесимметричного сопла в затопленное пространство [7, 8].

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе при числе $M_\infty = 4,67$ взаимодействия сходящихся осесимметричных ударных волн с острым и притупленным конусами. В процессе испытаний изучалось влияние угла конусности сходящейся ударной волны, формы модели и положения ее относительно ударно-волновой конфигурации на структуру течения и распределение давления на поверхности модели.

Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 4,67$ и давлении в форкамере $p_0 = 6$ или 10 атм. На фиг. 1 представлена схема проведения испытаний. Для создания сходящихся осесимметричных ударных волн использовались два различных цилиндра с протоком конической формы и острыми передними кромками. Внешние диаметры цилиндров были одинаковыми и равны 178 мм, а углы конусности θ различались в 2 раза и были равны 10 и 5°.

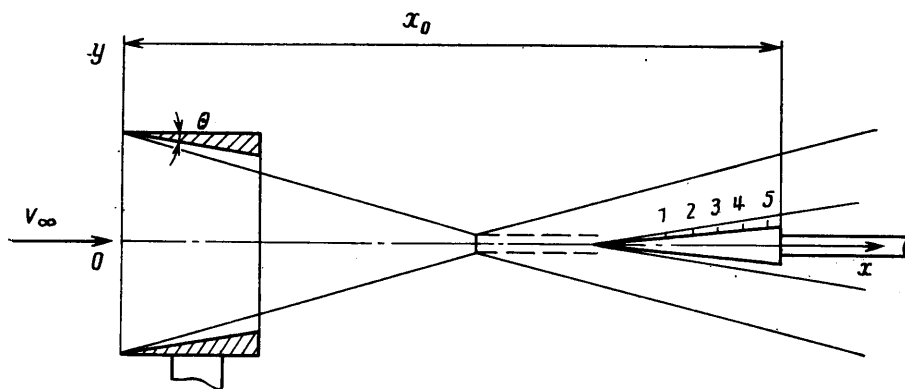
Цилиндры с протоком устанавливались на первой ступени в рабочей части установки и, введенные в поток, оставались неподвижными в течение экспериментов. Исследованные модели крепились ко второй ступени и во время экспериментов перемещались навстречу набегающему потоку.

Модель представляла собой усеченный конус с углом полураствора 7°, диаметром модели 38 мм и сменными носками: острым и притупленным по сфере с радиусом $R = 4$ мм. Последнее позволило одними и теми же измерительными средствами провести исследование по влиянию притупления. Модель имела 10 дренажных отверстий для замера давления на поверхности. Дренажные отверстия (по пять) располагались симметрично на верхней и нижней образующей конуса на расстоянии от донного среза соответственно 15, 35, 55, 75 и 95 мм.

Отверстия с помощью стальных трубок диаметром 1,2 мм и длины ~ 1 м соединялись с универсальным пневмокоммутатором, в котором в качестве измерительного элемента использовались датчики типа ДМИ. Регистрация осуществлялась с помощью измерительно-вычислительного комплекса на базе ЭВМ СМ4 с последующей вторичной обработкой результатов на ПЭВМ. Визуализация течения осуществлялась с помощью теневого прибора ИАБ 451.

В процессе испытаний модели перемещались по оси x : для цилиндра с конусностью $\theta = 10^\circ$ в диапазоне $x_0 = 390\text{--}150$ мм, а с $\theta = 5^\circ$ в диапазоне $x_0 = 440\text{--}200$ мм. Во всех случаях координата x_0 , характеризующая положение модели, отсчитывалась от переднего среза цилиндра до кормового среза модели (см. фиг. 1). Поэтому координаты дренажных отверстий при одинаковых x_0 совпадали для острой и притупленной моделей.

Измерения давления и теневые снимки проводились при изменениях x_0 дискретно через $\Delta x_0 = 10$ мм и при фиксированном в каждом эксперименте положении оси модели относительно оси цилиндра $y_0 \approx 0$.



Фиг. 1

На фиг. 2 представлены теневые снимки картины течения взаимодействия острого (а) и притупленного (б) конусов при $\theta=10^\circ$ и $y_0 \approx 0$ для $x_0=390, 350, 310, 270$ и 230 мм, отмеченных соответственно цифрами 1–5. На снимках видно, что в отсутствие взаимодействия с моделью (1а, 1б) наблюдается нерегулярное отражение сходящейся ударной волны от оси симметрии с образованием диска Маха, контактной поверхности и отраженной ударной волны, что наблюдалось многими исследователями ранее в экспериментах при истечении сверхзвуковых осесимметричных струй из сопла в затопленное пространство [7, 8].

Поток за диском Маха имеет дозвуковую скорость, а затем разгоняется до сверхзвуковой. Об этом свидетельствует образование отошедшей ударной волны перед притуплением на снимке 2б. Вне этой области поток всюду сверхзвуковой. Так как диаметр диска Маха меньше диаметра мишени модели, то вблизи диска обтекание становится смешанным (до- и сверхзвуковым потоками), происходит взаимодействие контактного разрыва с поверхностью модели (2а, 2б).

После пересечения носка конуса диска Маха структура течения резко изменяется, становится более сложной.

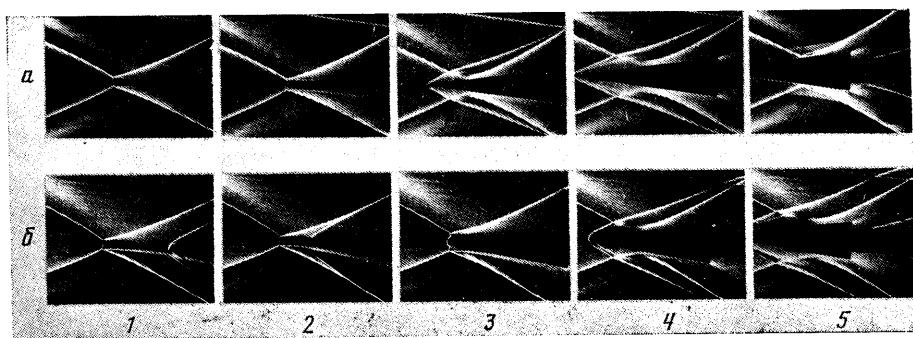
Рассмотрим сначала взаимодействие с острым конусом (3а–5а). На снимках видно, что после пересечения конусом диска Маха происходит отрыв потока с носка — образуется жидкий конус, который индуцирует скачок уплотнения, происходит взаимодействие этого скачка и жидкого конуса с падающей сходящейся ударной волной (в результате образуются рядом две тройные точки) и затем отражение сходящейся ударной волны от поверхности тела.

Угол полураствора жидкого конуса и соответственно скачка уплотнения уменьшается при уменьшении величины x_0 . При $x_0=230$ мм (5а) отрывная зона в виде жидкого конуса и с ней вторая тройная точка исчезают. Скачок уплотнения, индуцируемый конусом, в этом случае становится слабым и потому плохо просматривается на снимке. Однако на этом снимке отчетливо виден образующийся при его взаимодействии с падающей сходящейся ударной волной более сильный скачок уплотнения.

В окрестности точки падения сходящейся ударной волны на поверхность конуса возникает небольшая локальная отрывная зона со скачком уплотнения перед ней.

Рассмотрим теперь подробнее теневые снимки при взаимодействии со сходящейся ударной волной притупленного конуса. На снимке 2б отошедшая от носка ударная волна исчезает (сравните со снимком 1б), что свидетельствует уже о дозвуковой скорости потока в этой области.

На снимке 3б видно, что после пересечения носком конуса диска Маха



Фиг. 2

вблизи него образуется серия почти параллельных скачков уплотнения (на снимке не меньше пяти). Более подробное изучение этого явления с использованием скоростной киносъемки при непрерывном движении модели навстречу потоку показало, что множественные ударные волны возникают и при пересечении диска Маха острым конусом и телами другой формы. Было обнаружено также, что при прохождении этих тел сквозь диск Маха количество скачков последовательно уменьшается до одного, а затем они совсем исчезают.

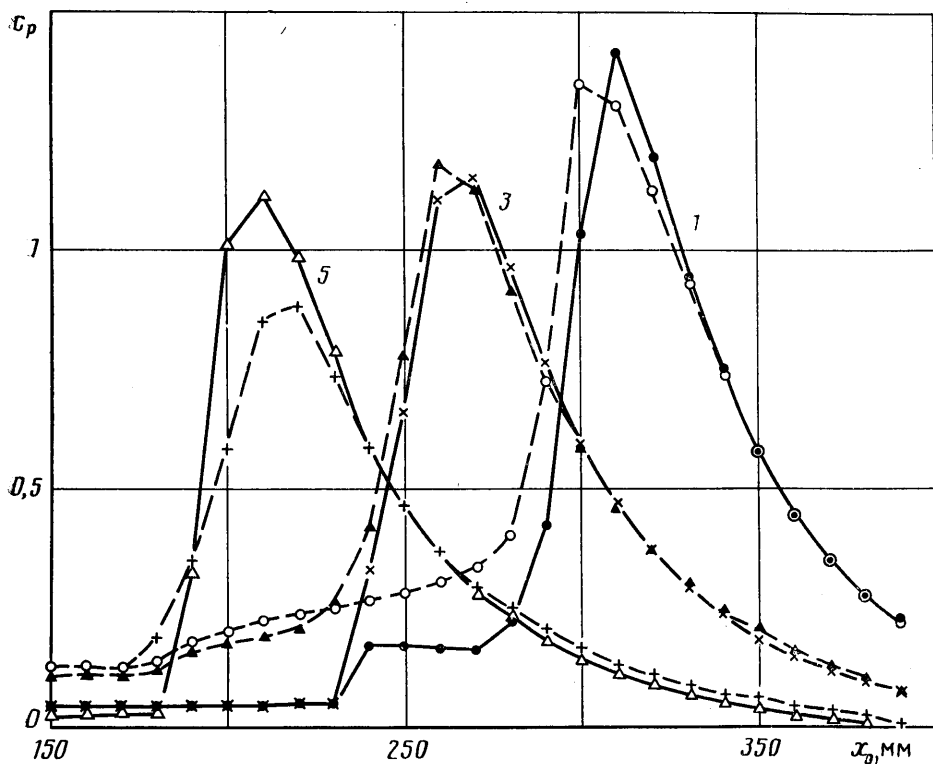
Появление таких скачков наблюдалось в узкой области значений x_0 при «сохранении» части диска Маха. Это указывает на то, что такая структура является свойством трансзвуковых течений. Аналогичные множественные ударные волны наблюдались, например, в областях, примыкающих к местным сверхзвуковым зонам на профиле с ламинарным пограничным слоем [9].

После исчезновения этих скачков по мере уменьшения x_0 на затупленном конусе, как и на остром, формируется отрывная зона в виде жидкого конуса, образуются рядом две тройные точки с соответствующими скачками уплотнения и сильный отраженный от поверхности конуса скачок.

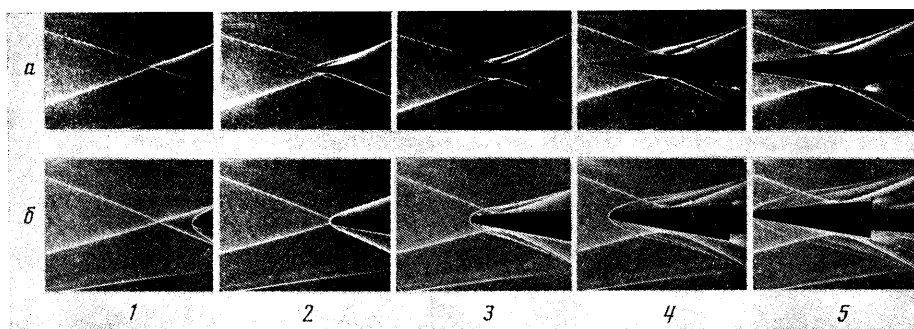
В отличие от острого на затупленном жидкий конус не исчезает во всем исследованном диапазоне x_0 , вплоть до момента, когда падающая сходящаяся ударная волна попадает в кормовую часть тела. В этом случае отрывная зона (жидкий конус) охватывает всю боковую поверхность модели.

На фиг. 3 представлены полученные экспериментальные зависимости коэффициента давления c_p от положения моделей x_0 . Цифрами 1, 3, 5 отмечены зависимости, полученные датчиками, соответственно находившимися на расстоянии 95, 55 и 15 мм от донного среза. Сплошные линии соответствуют острому конусу, а пунктирные — затупленному.

Отметим высокий уровень зарегистрированного датчиками давления в окрестности отражения сходящейся ударной волны от поверхности конуса. Максимальные коэффициенты давления на фиг. 3 в этих областях в 30–40 раз превышают значения c_p в этих же точках при отсутствии взаимодействия и близки к значению коэффициента давления в точке торможения за прямой ударной волной c_{p01} при том же числе Маха набегающего потока. Зависимости $c_p(x_0)$ для всех датчиков на больших расстояниях x_0 до максимальных значений c_p включительно практически совпадают для острого и затупленного конусов. Различия в показаниях датчиков наблюдаются на остром и затупленном конусах, когда они попадают в отрывные зоны, характер проявления которых в зависимости от носка различный. Для затупленного конуса датчик 3, начиная с $x_0=230$ мм, а 5 — с $x_0=170$ мм, показывают одинаковые давления с датчиком 1, так как при этих



Фиг. 3

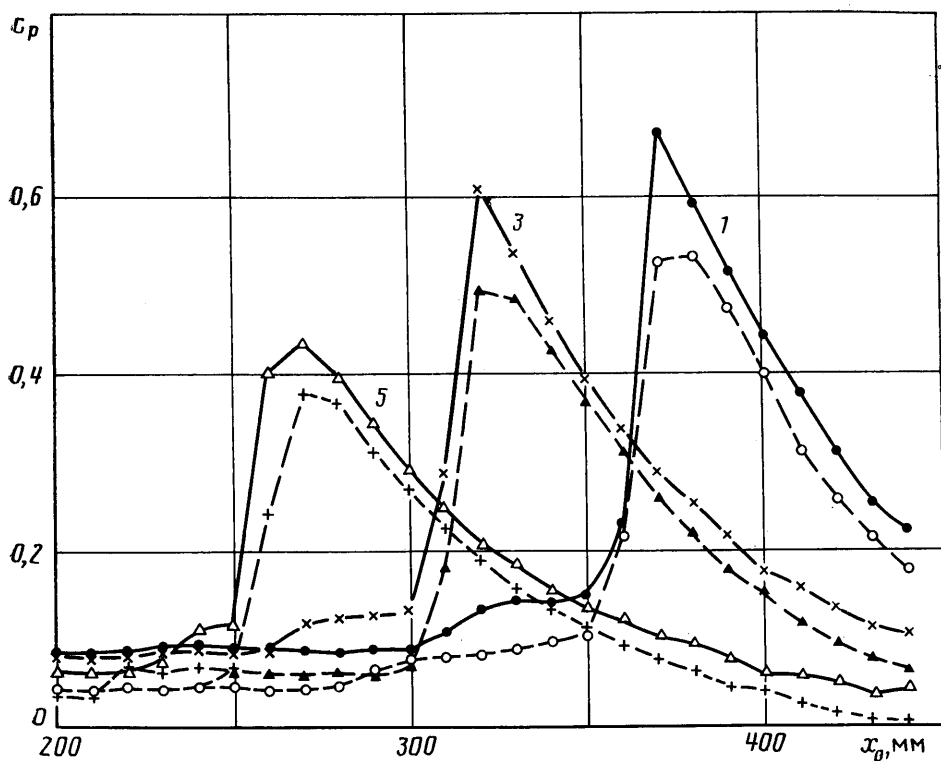


Фиг. 4

значениях x_0 они последовательно попадают в отрывную зону, для которой характерно постоянное для каждого x_0 значение давления.

На остром конусе при $x_0 = 240-270$ мм датчик 1 находится в отрывной зоне, показывая постоянное давление. Начиная с $x_0 = 230$ мм отрывная зона исчезает и датчики 1, 3, а затем и 5 при $x_0 = 180$ мм фиксируют уровни давления при отсутствии взаимодействия со сходящейся ударной волной.

На фиг. 4 представлены теневые снимки картины течения взаимодействия острого (а) и притупленного (б) конусов при $\theta = 5^\circ$ и $y_0 \approx 0$ для $x_0 = 440, 400, 360, 320$ и 280 мм, отмеченных соответственно цифрами 1–5. В этом случае свободное (в отсутствие влияния модели) отражение сходящейся ударной волны от оси происходит регулярно (см. 1а, 1б).



Фиг. 5

Это находится в противоречии с известной гипотезой Куранта и Фридрихса [5], предполагавших, что отражение от оси конической ударной волны происходит нерегулярно (с образованием диска Маха) всегда, в том числе и при малых углах падения (конусности).

Недавно эта гипотеза получила дополнительную теоретическую поддержку [10]. Вместе с тем в экспериментах постоянно при малых интенсивностях падающей ударной волны наблюдается регулярное отражение. Об этом знали и авторы самой гипотезы, о чем они упоминали в своей монографии [5], но дали другое толкование. Кроме того, автор работы [8] наблюдал это явление в экспериментах при истечении сверхзвуковой осесимметричной струи из сопла в затопленное пространство.

Противоречия между теорией и экспериментом, по мнению автора, объясняется предположением во всех теориях о коничности течения в рамках идеальной жидкости, что практически нереализуемо на практике.

Продолжим рассмотрение теневых снимков на фиг. 4, а. При прохождении острия конуса точки схождения ударных волн наблюдается взаимодействие сходящейся ударной волны со скачком уплотнения, индуцируемым носком конуса. После этого взаимодействия ударная волна регулярно отражается от поверхности конуса. Перед точкой взаимодействия видна тонкая, примыкающая к поверхности конуса отрывная зона, которая в свою очередь индуцирует скачок уплотнения. Интенсивность его выше скачка, исходящего из вершины конуса. Поэтому он более отчетливо виден на снимках. Также более отчетливо виден скачок, образованный в результате взаимодействия его с падающей сходящейся волной, по сравнению с аналогичным взаимодействием скачка, исходящего с вершины конуса. Все эти скачки уплотнения затем пересекаются, образуя λ -видную структуру ударных волн.

Качественная картина взаимодействия со сходящейся ударной волной при испытаниях затупленного конуса (см. фиг. 4б) такая же, как и при взаимодействии с острым конусом. Отличие только в том, что в этом случае вследствие отошедшей от притупления более сильной ударной волны все отмеченные выше особенности структуры течения наблюдаются более контрастно.

Интересно отметить, что при достаточно близком расположении притупленного конуса к точке схождения ударной волны образуется диск Маха (2б).

На фиг. 5 представлены для случая $\theta=5^\circ$ экспериментальные зависимости $c_p(x_0)$ для острого и затупленного конусов, полученные теми же датчиками (и с теми же обозначениями), что и на фиг. 3. Максимумы давления, фиксируемые всеми датчиками, в этом случае в 2–2,5 раза меньше, чем при $\theta=10^\circ$. Уровни давления в отрывных зонах на остром конусе заметно выше ($\sim 1,5$ раза) аналогичного уровня давления на затупленном конусе.

В заключение автор выражает признательность Ю. М. Липницкому за постановку задачи и благодарит Е. Н. Богачеву за помощь в оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забабахин Е. Н., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988, 171.
2. Шуршалов Л. В. О расчете кумулятивных струй // Изв. АН СССР. МЖГ. 1975. № 4. С. 116–122.
3. Соколов И. В. Поведение осесимметричной ударной волны вблизи точки кумуляции // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. Вып. 4. С. 1331–1335.
4. Соколов И. В. Высокоскоростные кумулятивные газовые струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 4. С. 148–152.
5. Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 427 с.
6. Ферри А. Аэродинамика сверхзвуковых течений. М; Л.: Гостехиздат, 1952. 467 с.
7. Полубояринов А. К., Спириин Н. И. Взаимодействие ударной волны с тангенциальным разрывом // Инж.-физ. журн. 1971. Т. 21. № 2. С. 251–256.
8. Мельников Д. А. Отражение скачков уплотнения от оси симметрии // Изв. АН СССР. Мех. и маш. 1962. № 3. С. 24–30.
9. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 181 с.
10. Рылов А. И. К вопросу о невозможности регулярного отражения стационарной ударной волны от оси симметрии // ПММ. 1990. Т. 54. № 2. С. 245–249.

Москва

Поступила в редакцию
4.XII.1990