

УДК 532.582.3.533.6.011.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ДВУХ ТЕЛ

Н. Н. Пилюгин, В. С. Хлебников*

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва

* Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, 140180 Жуковский

Проведено экспериментальное исследование сверхзвукового трехмерного обтекания двух тел, расположенных одно за другим. Проанализирована структура течения между телами. Определены зоны действия максимальных силовых нагрузок на поверхности заднего тела.

В настоящее время в связи с развитием авиационно-космической техники представляет интерес исследование трехмерных течений при сверхзвуковом обтекании двух тел, расположенных одно за другим. С одной стороны, это связано с проблемой торможения летательных аппаратов (осесимметричный груз и крестообразный или планирующий парашют), с другой — с разделением летательных объектов (беспилотный самолет и осесимметричная ступень ракеты-носителя).

В данной работе проведено экспериментальное исследование трехмерного нестационарного сверхзвукового (число Маха $M = 3$) течения, реализующегося при обтекании двух тел. В первой серии испытаны пары, у которых в качестве переднего используются тела с двумя, тремя и четырьмя плоскостями симметрии (торцы прямоугольной, треугольной и квадратной формы), а в качестве заднего — осесимметричное тело (круговой торец). Во второй серии испытаны пары, у которых в качестве переднего тела используется конус или сферы, а в качестве заднего — торцы прямоугольной, треугольной и квадратной формы.

Картина обтекания пары тел сверхзвуковым потоком газа сложна и многообразна. Изучение данного класса течений в основном проводилось на осесимметричных парах изолированных друг от друга тел. При сверхзвуковом обтекании в зависимости от расстояния между телами l_0 реализуется одна из двух схем течения [1–3]: при $l_0 < l_0^*$ отрывная схема течения, когда поток отрывается с переднего тела и присоединяется к заднему; при $l_0 \geq l_0^*$ схема с течением в донной области за передним телом и головным скачком уплотнения перед задним телом. Здесь l_0^* — критическое расстояние между телами, при котором происходит перестройка одной структуры течения в другую. Перестройка течения резко меняет картину обтекания тел и, следовательно, существенно влияет как на локальные, так и на интегральные силовые и тепловые характеристики заднего тела.

В последнее время появилось много работ, посвященных изучению закономерностей указанных осесимметричных течений [4–7]. В частности, получено распределение давления и теплового потока на поверхности тела, расположенного в сверхзвуковом следе [8], исследовано влияние глубины полости и проницаемости заднего тела на распределение аэротермодинамических характеристик на его поверхности [9, 10], измерено аэродинами-

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы “Интеграция” (код проекта И(А-105-4)).

ческое сопротивление пары тел, соединенных цилиндрическим стержнем [11], определены пульсации течения в отрывной зоне между телами [12] и т. д.

В случае трехмерного обтекания пары тел возникает автоколебание течения между телами независимо от того, является оно отрывным течением или течением со скачком уплотнения перед задним телом. В работе [13] показано, что течение вблизи сферы с невращающейся иглой, на конце которой установлен плоский насадок, является трехмерным (имеется две плоскости симметрии, проходящих через ось иглы параллельно большему и меньшему основаниям насадка). При этом реализуется два типа автоколебаний течения между насадком и сферой. Первому типу соответствуют колебания при отрыве потока с насадка или иглы перед сферой, когда давление в области присоединения в одной плоскости симметрии пары тел значительно отличается от давления в другой плоскости симметрии, вследствие чего газ из области повышенного давления перетекает в область пониженного давления и “выплескивается” из отрывной зоны перед сферой. Второй тип колебаний обусловлен тем, что насадок в плоскостях симметрии имеет различные поперечные размеры, и, следовательно, критические расстояния, при которых происходит перестройка течения между насадком и сферой в этих плоскостях, различны: $l_1^* \neq l_2^*$. В силу этого при $l_1^* \leq l_0 < l_2^*$ течение неустойчиво: отрыв потока происходит то с насадка, то с иглы. Автоколебания оказывают существенное влияние на величину максимального теплового потока в области присоединения на сфере.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей течения при трехмерном сверхзвуковом обтекании двух тел.

В качестве переднего тела в экспериментах использовались: торец прямоугольной формы с длиной сторон $a = 17,5$ мм и $b = 35$ мм, торцы правильной треугольной и квадратной формы с длиной стороны $a = 25$ мм, конус с диаметром основания $d^0 = 14$ мм и высотой $h^0 = 25$ мм, сферы с диаметрами $d = 14; 18$ мм. Передние тела крепились на тонкой боковой державке ромбовидного профиля, установленной под углом 60° к набегающему потоку. Торец треугольной формы крепился к державке в одной из вершин. Высота, опущенная из этой вершины на основание треугольника, лежит в плоскости симметрии державки. Торец прямоугольной формы крепился к державке в середине малого основания, и его плоскость симметрии совпадала с плоскостью симметрии державки. Аналогичным образом крепился к державке торец квадратной формы. Конус и сферы крепились так, чтобы плоскости симметрии моделей переднего тела совпадали с плоскостью симметрии державки.

В качестве заднего тела использовались: круговой торец с диаметром $D = 60$ мм, торец прямоугольной формы с длиной сторон $a_1 = 30$ мм и $b_1 = 60$ мм, торец правильной треугольной формы с длиной стороны $a_2 = 60$ мм и торец квадратной формы с длиной стороны $a_3 = 60$ мм. Модели заднего тела крепились на цилиндрической державке с внешним диаметром 30 мм, внутри которой проходили дренажные трубки. Направления, по которым на моделях располагались дренажные отверстия, указаны ниже при обсуждении результатов исследований. Во время эксперимента заднее тело могло перемещаться вдоль потока с заданным шагом. Центры переднего и заднего тел располагались на одной оси.

Поскольку, как отмечалось выше, реализующееся между двумя телами течение нестационарно, при измерении давления на заднем теле показания группового регистрирующего монотра в начальный момент времени колебались. Однако через несколько секунд давление в измерительной трассе устанавливалось (демпфировалось), после чего снимались показания прибора. Измеренное давление является интегральной характеристикой данного нестационарного процесса.

Испытания проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе с осесимметричной рабочей частью и подогревом потока при $M = 3$, температуре торможения потока $T_0 = (393 \pm 3)$ К и давлении торможения потока $P_0 = (49 \pm 0,1)$ Н/см². Число Рейнольдса,

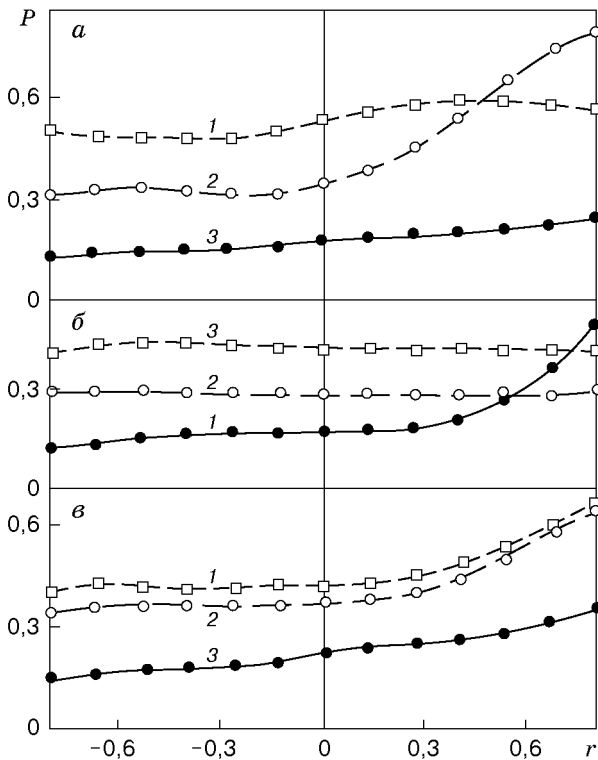


Рис. 1

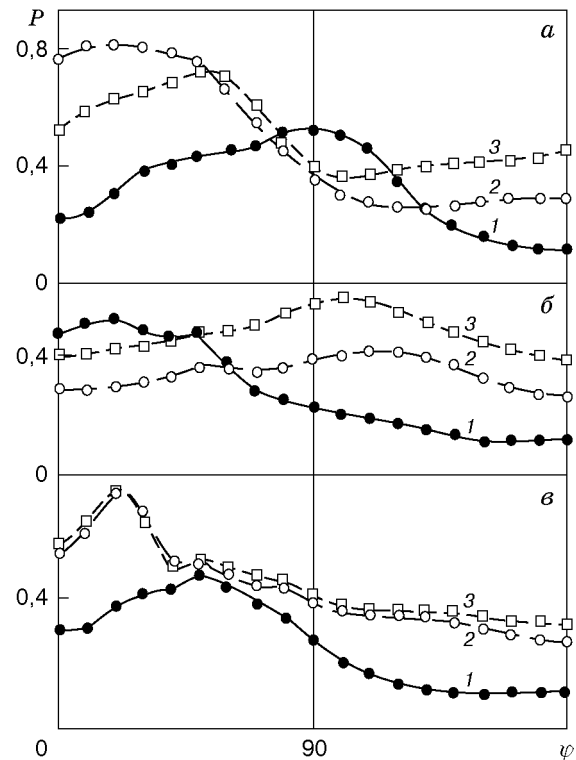


Рис. 2

Рис. 1. Распределение давления на круговом торце в диаметральной плоскости в следе за прямоугольным (*a*), квадратным (*б*) и правильным треугольным (*в*) торцами:

1 — отрывное течение (*a* — $l = 3,4$; *б, в* — $l = 3,6$); 2, 3 — течение со скачком уплотнения перед задним торцом (2 — *a* — $l = 3,8$; *б, в* — $l = 4,8$; 3 — *a* — $l = 5,7$; *б* — $l = 8,0$; *в* — $l = 7,2$)

Рис. 2. Распределение давления на круговом торце по окружности в следе за прямоугольным (*a*), квадратным (*б*) и правильным треугольным (*в*) торцами (обозначения те же, что на рис. 1)

вычисленное по параметрам набегающего потока и характерному поперечному размеру заднего тела, изменялось в диапазоне $10^6 \leq Re_D \leq 1,4 \cdot 10^6$.

Для получения более полной информации о течении между телами производилась визуализация структуры потока с использованием прибора Теплера и лазерного ножа. Кроме того, получено распределение предельных линий тока на поверхности заднего тела.

Рассмотрим случай обтекания кругового торца, расположенного на различных расстояниях в следе за торцами прямоугольной, квадратной и треугольной формы. Дренажные отверстия на круговом торце располагались в двух направлениях: в диаметральной плоскости, которая совпадала с плоскостью державки переднего тела, и вдоль окружности радиуса $r_0 = 24$ мм.

На рис. 1, 2 представлены зависимости давления P на круговом торце в диаметральной плоскости от координаты r (рис. 1) и по окружности от координаты ψ (рис. 2) в следе за торцами прямоугольной, квадратной и треугольной формы при различных расстояниях l между телами. Здесь P — отношение давления в некоторой точке на торце p к давлению торможения за прямым скачком уплотнения в невозмущенном потоке p'_0 , r — отношение координаты точки r_1 , отсчитываемой от центра торца в диаметральном направлении, к радиусу торца R (координата положительна в направлении за державку переднего те-

ла и отрицательна в противоположном направлении), φ — центральный угол на торце, отсчитываемый по окружности от плоскости державки переднего тела, l — отношение расстояния между телами l_0 к диаметру d_1 окружности, описанной вокруг переднего тела.

В отличие от осесимметричного случая при трехмерном обтекании двух тел, как и в случае обтекания сферы с иглой, на конце которой установлен плоский насадок, течение между телами нестационарное (наблюдается автоколебание). Перестройка отрывного течения в течение с головным скачком уплотнения перед задним телом зависит от отношений размеров переднего тела к диаметру заднего тела и расстояния между ними.

Следует отметить, что на характер течения между телами и распределение давления на заднем торце существенное влияние может оказывать державка переднего тела.

При отрывном течении между телами для всех перечисленных передних тел распределение давления в диаметральной плоскости заднего торца имеет такой же характер, как и в случае обтекания осесимметричной пары тел [2]. При этом державка переднего тела существенно влияет на давление за ней при $r > 0$ (кривые 1 на рис. 1). После перестройки отрывного течения между телами, там, где влияние державки переднего тела слабое, давление на заднем торце возрастает в несколько раз (кривые 2, 3 на рис. 1). Влияние державки переднего тела на давление в диаметральной плоскости за ней ($r > 0$) за треугольным торцом практически сохранилось (кривые 2, 3 на рис. 1, в). За прямоугольным торцом оно существенно лишь сразу после перестройки отрывного течения (кривая 2 на рис. 1, а), а по мере удаления заднего тела от переднего торца быстро ослабевает (кривая 3 на рис. 1, а). За квадратным торцом оно практически отсутствует (кривые 2, 3 на рис. 1, б).

Из анализа распределения давления вдоль кромки торца (рис. 2) следует, что при изменении расстояния l характер зависимости $P(\varphi)$ существенно изменяется. Например, за прямоугольным торцом при $l = 3,4 < l^*$ максимальное давление наблюдалось при $\varphi = 90^\circ$, минимальное — при $\varphi = 180^\circ$ (кривая 1 на рис. 2, а). После перестройки отрывного течения при $l = 5,7 > l^*$ минимальное давление наблюдалось при $\varphi = 100^\circ$, максимальное — при $\varphi = 180^\circ$ (кривая 3 на рис. 2, а). Различие значений давления вдоль кромки кругового торца приводит к перетеканию газа из области повышенного давления в область пониженного, в результате чего происходят колебания отрывного течения и пульсации головного скачка уплотнения перед задним торцом после его перестройки.

Рассмотрим особенности течения между осесимметричными телами (конусом, сферами) и торцами прямоугольной, квадратной и треугольной формы при сверхзвуковом режиме обтекания.

Торец прямоугольной (квадратной) формы располагался в следе таким образом, чтобы плоскость симметрии, проходящая через середину малой стороны (одной из сторон) и центр торца, совпадала с плоскостью симметрии державки переднего тела. Торец правильной треугольной формы устанавливался в следе так, что одна из вершин треугольника находилась за державкой переднего тела, а опущенная из нее на противоположную сторону высота лежала в плоскости симметрии этой державки.

На поверхности торцов определим направления, вдоль которых будет измеряться давление. Для прямоугольного торца дренажные отверстия располагались вдоль его диагонали и стороны b_1 . Начало координат для обоих направлений измерения давления на торце находилось вблизи точки их пересечения за державкой переднего тела (в первом случае в вершине прямоугольника, во втором — на стороне a_1). Аналогично располагались дренажные отверстия на торце квадратной формы, так же выбиралось на ней начало координат для каждого направления измерения давления.

На торце треугольной формы дренажные отверстия размещались в двух направлениях: вдоль высоты треугольника в плоскости державки переднего тела и в перпендику-

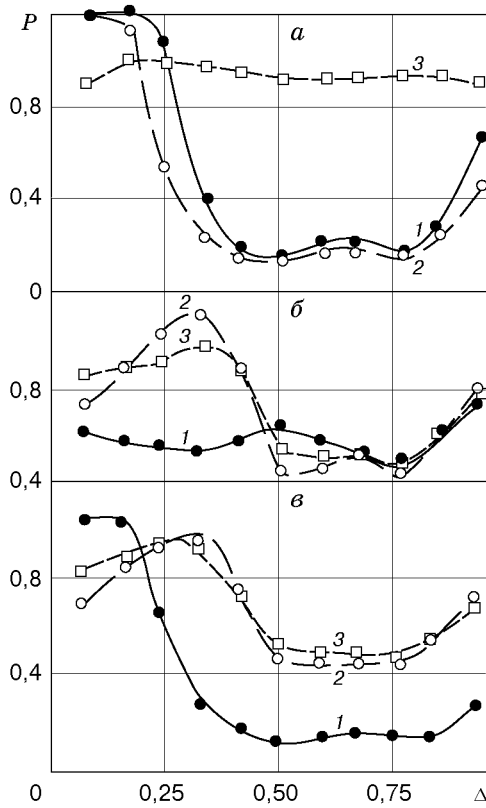


Рис. 3

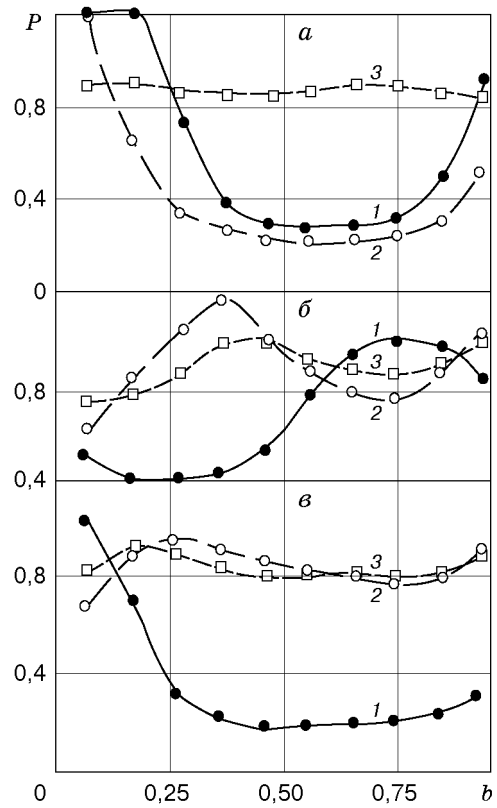


Рис. 4

Рис. 3. Распределение давления на прямоугольном торце вдоль его диагонали в следе за конусом (а) и сферами с $d = 14$ мм (б) и $d = 18$ мм (в):

а — 1 — $l = 5,0$; 2 — $l = 7,1 < l^*$; 3 — $l = 9,3 > l^*$; б — 1 — $l = 5,1 < l^*$; 2 — $l = 7,3$; 3 — $l = 9,4 > l^*$; в — 1 — $l = 3,9 < l^*$; 2 — $l = 5,6$; 3 — $l = 7,2 > l^*$

Рис. 4. Распределение давления на прямоугольном торце вдоль его стороны b_1 в следе за конусом (а) и сферами с $d = 14$ мм (б) и $d = 18$ мм (в) (обозначения те же, что на рис. 3)

лярном ей направлении параллельно стороне a_2 . Начало координат на поверхности торца при измерении давления вдоль указанных выше линий выбрано в точке их пересечения. Анализ характеристик течений между осесимметричными телами и торцами прямоугольной, квадратной и треугольной формы в основном проводится по распределениям давления на них для различных передних тел и расстояний между телами. Результаты измерений дополнялись визуализацией картины обтекания.

На рис. 3, 4 представлены распределения давления на прямоугольном торце вдоль его диагонали (рис. 3) и стороны b_1 (рис. 4) в следе за конусом и сферами. Здесь Δ — отношение координаты вдоль диагонали прямоугольника Δ_0 к ее длине Δ_1 , b — отношение координаты вдоль стороны прямоугольника b_0 к ее длине b_1 , $l = l_0/d$, $l^* = l_0^*/d$.

Результаты визуализации структуры потока показаны на рис. 5. Анализ фотографий показал, что, как и в случае осесимметричного обтекания пары моделей [3], в зависимости от расстояния между телами реализуется либо отрывное течение, либо течение с головным скачком уплотнения перед торцом. Однако в данном случае имеются особенности. Так, при отрывном обтекании в области присоединения вблизи выступающих в невозмущенный поток частей торца наблюдается скачок уплотнения (кадр 1 на рис. 5, а, б). Представленное на рис. 6, а распределение предельных линий тока подтверждает это: вблизи выступающих

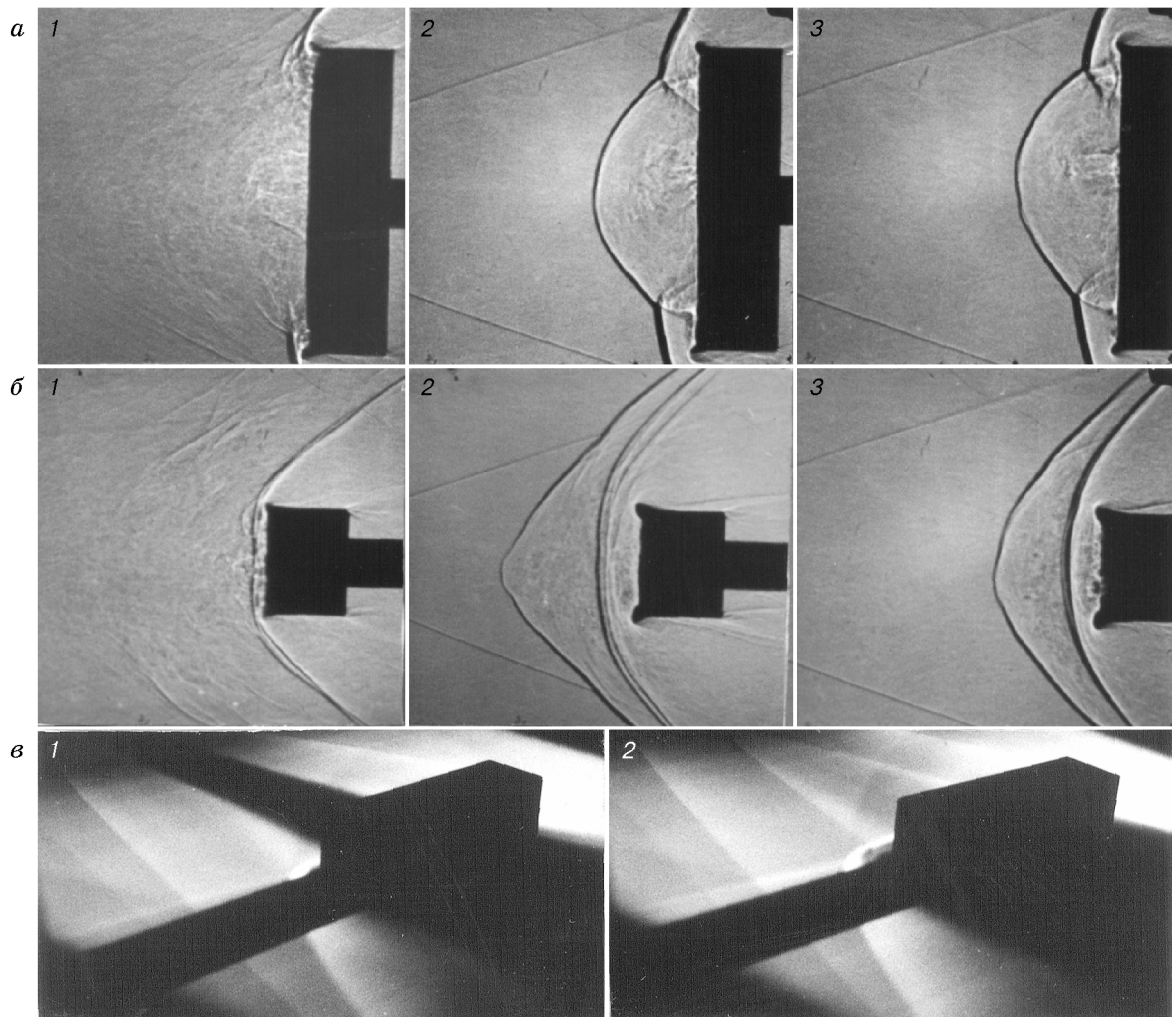


Рис. 5. Визуализация структуры потока при обтекании прямоугольного торца в следе за сферой ($d = 18$ мм):

a, б — в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (параллельных большему и меньшему основанию прямоугольного торца соответственно) с использованием прибора Теплера (1 — $l < l^*$; 2, 3 — $l > l^*$); *в* — методом лазерного ножа (1 — $l < l^*$; 2 — $l > l^*$)

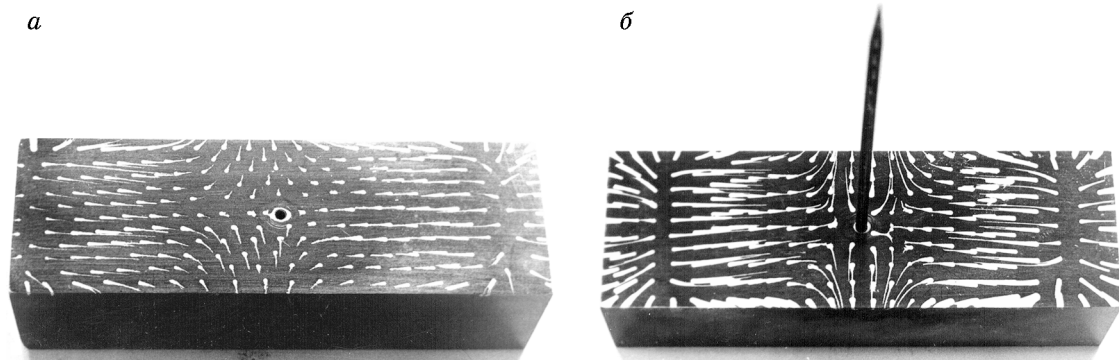


Рис. 6. Распределение предельных линий тока на прямоугольном торце:
a — при отрывном обтекании; *б* — при обтекании торца с иглой

в невозмущенный поток кромок торца наблюдаются линии растекания. Поток вдоль заднего тела стекает к центру торца и “выплескивается” по обе стороны в области его малой оси симметрии. Для сравнения на рис. 6, б показано распределение предельных линий тока при отрывном обтекании торца с иглой. Характер распределений предельных линий тока аналогичен описанному выше.

Анализ результатов экспериментов показал, что течение между телами нестационарное. Об этом свидетельствуют кинограммы обтекания тел и пульсации давления на торце прямоугольной формы.

Из анализа распределения давления на торце при отрывном обтекании (кривые 1 на рис. 3 и кривая 2 на рис. 3, а) следует, что при приближении к кромке торца ($\Delta = 0,93$), где наблюдается скачок уплотнения, давление возрастает.

После перестройки трехмерное течение вблизи заднего тела отличается от аналогичного осесимметричного течения [2]. В данном случае головной скачок уплотнения перед торцом как бы разбивается на пару скачков. Вблизи оси следа из-за провала в профиле полного давления головной скачок уплотнения перед задним телом вытянут в направлении переднего тела, а около выступающих из следа частей торца становится плоским (кадры 2, 3 на рис. 5, а, б). В результате в зависимости от угла пересечения и интенсивности скачков уплотнения в области взаимодействия конфигурация ударных волн может меняться. В этой области следует ожидать появления экстремальных значений тепловой и силовой нагрузки на торец.

Визуализация обеих картин течения между сферой и прямоугольным торцом с использованием метода лазерного ножа приведена на рис. 5, в.

Из анализа распределения давления на торце прямоугольной формы после перестройки отрывного течения между телами следует, что при малом сопротивлении переднего тела (конуса) (кривая 3 на рис. 3, а) всплеска давления вблизи кромки торца не наблюдается, а при большом сопротивлении переднего тела (сферы) (кривые 2, 3 на рис. 3, б, в) вблизи кромки торца ($\Delta = 0,93$) давление существенно повышается. В центре торца ($\Delta = 0,5$) давление тем больше, чем меньше потери в головном скачке уплотнения перед передним телом (кривая 3 на рис. 3, а, в).

Для любых расстояний между телами распределение давления вдоль стороны b_1 имеет такой же характер, как и распределение вдоль диагонали (кривые 1, 3 на рис. 3, а, в и рис. 4, а, в).

На рис. 7, 8 представлены распределения давления на торце квадратной формы вдоль его диагонали (рис. 7) и стороны a_3 (рис. 8) в следе за конусом и сферой. Здесь Δ — отношение координаты вдоль диагонали квадрата Δ_0 к ее длине Δ_3 , a — отношение координаты вдоль стороны квадрата a_0 к ее длине a_3 .

Из приведенных на рис. 7, 8 зависимостей следует, что результаты измерений давления на торце прямоугольной формы в следе за осесимметричным телом справедливы и для торца квадратной формы. Следует отметить, что для пары тел сфера — торец квадратной формы давление вдоль стороны a_3 после перестройки между телами отрывного течения практически постоянно и примерно на 20 % больше давления торможения за прямым скачком уплотнения в невозмущенном потоке. Это объясняется тем, что поток, пришедший к стороне a , тормозился в нескольких косых скачках уплотнения, поэтому потери в них меньше, чем в прямом скачке уплотнения. Отметим также, что державка переднего тела при всех исследованных расстояниях между телами оказывает значительное влияние на величину давления на торцах прямоугольной формы при $\Delta < 0,4$ (см. рис. 3), $b < 0,4$ (см. рис. 4) и торцах квадратной формы при $\Delta < 0,25$ (см. рис. 7), $a < 0,35$ (см. рис. 8).

На рис. 9, 10 представлены распределения давления на торце правильной треугольной формы вдоль высоты h (рис. 9) и стороны a (рис. 10) в следе за конусом и сферами. Здесь

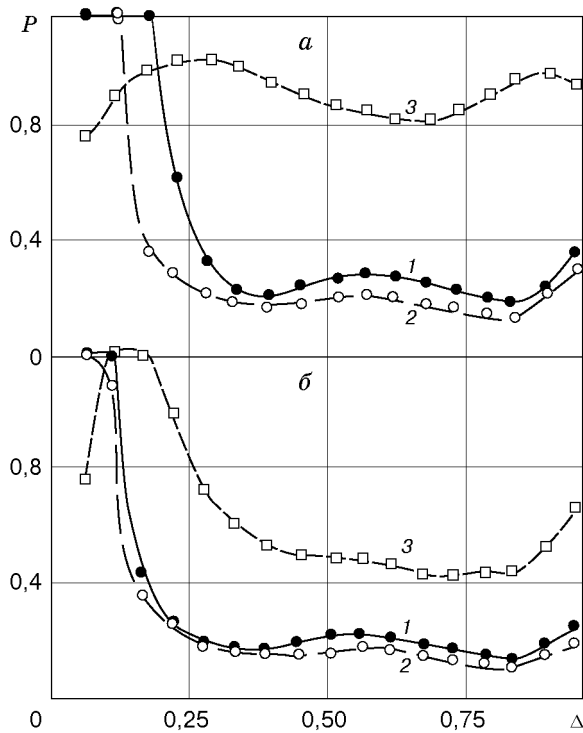


Рис. 7

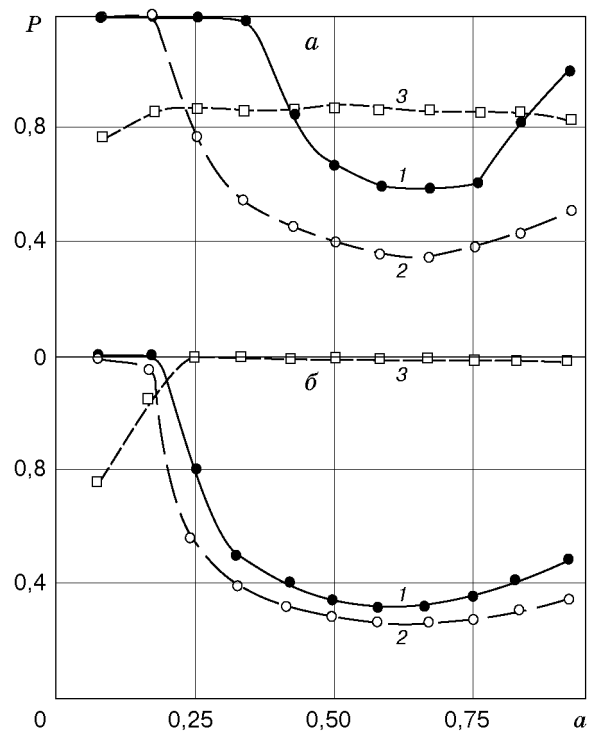


Рис. 8

Рис. 7. Распределение давления на квадратном торце вдоль его диагонали в следе за конусом (а) и сферой с $d = 18$ мм (б):
 а — 1 — $l = 5,7$; 2 — $l = 7,9 < l^*$; 3 — $l = 10,0 > l^*$; б — 1 — $l = 4,8$; 2 — $l = 8,4 < l^*$; 3 — $l = 9,5 > l^*$

Рис. 8. Распределение давления на квадратном торце вдоль его стороны a_3 в следе за конусом (а) и сферой с $d = 18$ мм (б) (обозначения те же, что на рис. 7)

h — отношение ординаты h_0 к расстоянию от начала координат до вершины треугольника h_{02} , a — отношение абсциссы a_0 к длине интервала ее изменения a_{02} .

На рис. 11 приведены теневые фотографии картины обтекания пары тел конус — торец треугольной формы при различных расстояниях между телами. Как и в случае обтекания пары тел конус (сфера) — торец прямоугольной (квадратной) формы, при всех исследованных расстояниях между телами течение нестационарное.

При обтекании пары тел конус (сфера) — торец треугольной формы при $l < l^*$ реализуется отрывное течение (кадр 1 на рис. 11). В этом случае давление в начале координат в несколько раз меньше давления в вершине треугольника, например, в следе за конусом — в $7 \div 8$ раз (кривые 1, 2 на рис. 10, а). При этом давление в вершине треугольника $P = 1,2$ значительно превышает давление торможения за скачком уплотнения в невозмущенном потоке. Это обусловлено, с одной стороны, наличием скачка уплотнения перед выступающей из следа вершиной треугольника (кадр 1 на рис. 11), с другой — тем, что пришедший к этому скачку поток тормозился до этого в косых скачках уплотнения. Из-за различия давления вдоль кромки треугольного торца следует ожидать перетекания газа вдоль него из области повышенного давления в область пониженного.

При $l > l^*$ происходит перестройка отрывного течения между телами (кадры 2–4 на рис. 11). Вследствие этого давление в центре торца ($h = 0,3$) в зависимости от аэродинамического сопротивления переднего тела возрастает в несколько раз. Так, за конусом

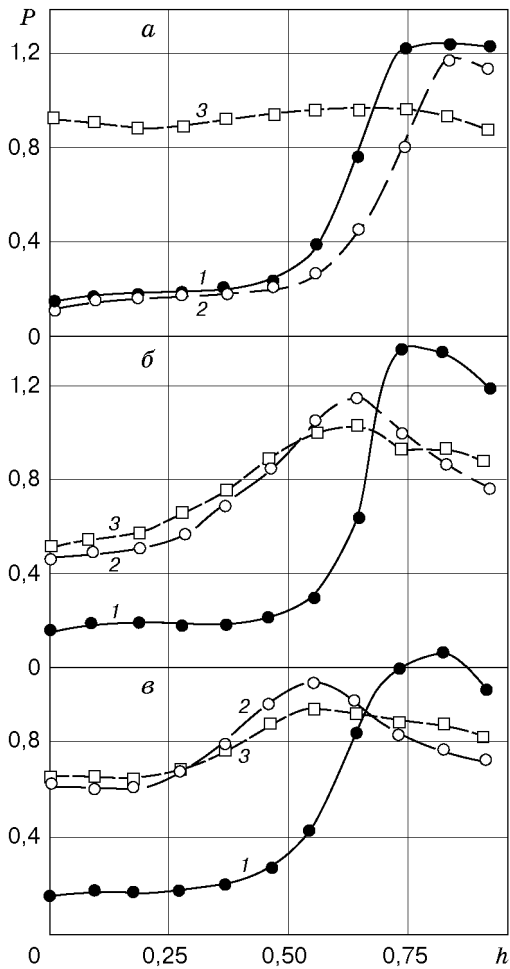


Рис. 9

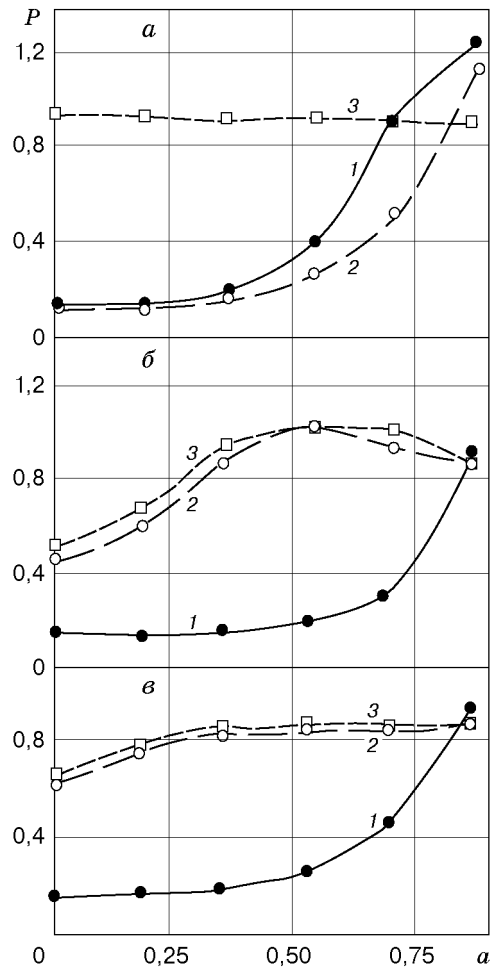


Рис. 10

Рис. 9. Распределение давления на правильном треугольном торце вдоль высоты в следе за конусом (а) и сферами с $d = 14$ мм (б) и $d = 18$ мм (в):

а — 1 — $l = 5,0$; 2 — $l = 7,1 < l^*$; 3 — $l = 9,3 > l^*$; б — 1 — $l = 5,2 < l^*$; 2 — $l = 7,3$; 3 — $l = 9,4 > l^*$; в — 1 — $l = 3,9 < l^*$; 2 — $l = 5,6$; 3 — $l = 7,2 > l^*$

Рис. 10. Распределение давления на правильном треугольном торце вдоль стороны в следе за конусом (а) и сферами с $d = 14$ мм (б) и $d = 18$ мм (в) (обозначения те же, что на рис. 9)

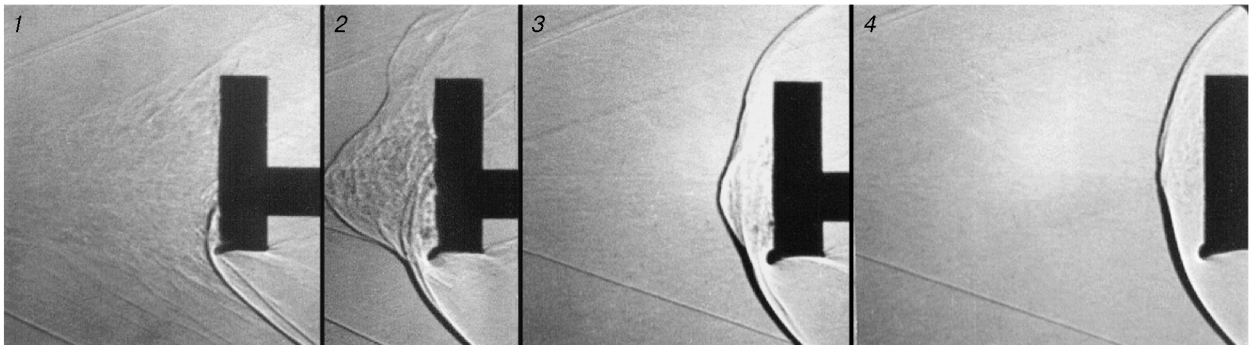


Рис. 11. Фотографии картины обтекания правильного треугольного торца в следе за конусом: 1 — отрывное обтекание; 2–4 — обтекание с головным скачком уплотнения перед торцом на различных расстояниях от конуса (2 — $l = 5,0 < l^*$; 3 — $l = 10,1$; 4 — $l = 11,0 > l^*$)

давление возросло в 4,5 раза (кривые 2, 3 на рис. 9,а), а за сферой ($d = 18$ мм) — в 3,5 раза (кривые 1, 2 на рис. 9,в). Кроме того, в следе за конусом давление вдоль кромки торца практически постоянное (кривая 3 на рис. 10,а), что подтверждает форма скачка уплотнения перед торцом (кадр 4 на рис. 11). В следе за сферами давление вдоль кромки торца изменяется существенно (кривые 2, 3 на рис. 10,б), что должно привести к перетеканию газа вдоль него.

Как и в случаях обтекания в следе торцов прямоугольной и квадратной формы, державка переднего тела оказывает существенное влияние на давление за ней на торце треугольной формы (см. рис. 9) ($h > 0,65$).

На основе представленных в работе результатов дан анализ особенностей и закономерностей течений, реализующихся при трехмерном сверхзвуковом обтекании двух тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charwat A. F., Roos J. N., Dewey F. C., Hitz J. A. An investigation of separated flows. Pt 1. The pressure field // J. Aerospace Sci. 1961. V. 28, N 6. P. 457–470.
2. Хлебников В. С. Осесимметричное обтекание пары тел сверхзвуковым потоком газа // Учен. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9, № 6. С. 108–114.
3. Хлебников В. С. Картина сверхзвукового обтекания пары тел и перестройка течения между ними // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 1. С. 158–165.
4. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1973. Т. 3.
5. Кудрявцев В. Н., Черкез А. Я., Шилов В. А. Исследование сверхзвукового обтекания двух разделяющихся тел // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1969. № 2. С. 91–99.
6. Головачев Ю. П., Леонтьева Н. В. Численное исследование обтекания затупленного тела, расположенного в области сверхзвукового следа. Л., 1984. (Препр. / АН СССР. Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе; № 918).
7. Белов И. А., Дементьев И. М., Исаев С. А. Моделирование сверхзвукового обтекания тел вращения с передней срывной зоной. Л., 1986. (Препр. / АН СССР. Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе; № 1033).
8. Еремейцев И. Г., Пилюгин Н. Н., Хлебников В. С., Юницкий С. А. Исследование аэродинамических характеристик и теплообмена тел в неравномерных сверхзвуковых потоках газа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.
9. Хлебников В. С. Влияние глубины полости на распределение давления и теплового потока по дну “стакана”, расположенного в следе тела, при сверхзвуковом обтекании // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1763. С. 22–38.
10. Хлебников В. С. Осесимметричное сверхзвуковое обтекание тела с протоком, расположенного в следе // Тр. ЦАГИ. 1987. Вып. 2370. С. 13–20.
11. Хлебников В. С. Об аэродинамическом сопротивлении пары тел при транс- и сверхзвуковом обтекании // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1990. № 3. С. 152–156.
12. Запрягаев В. И. Исследование пульсаций в отрывной зоне свободной каверны при сверхзвуковой скорости потока // ПМТФ. 1985. № 6. С. 50–58.
13. Хлебников В. С. Экспериментальное исследование сверхзвукового трехмерного отрывного течения между плоским насадком и сферой // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1987. № 5. С. 166–170.