

УДК 533.6.013.12

© 1990 г.

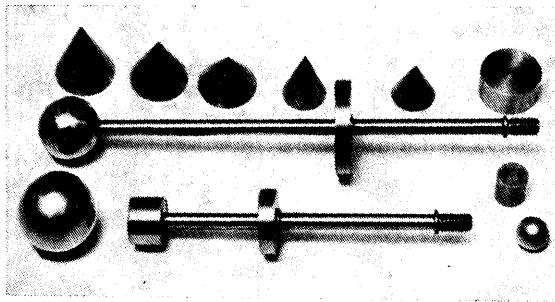
В. С. ХЛЕБНИКОВ

ОБ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ПАРЫ ТЕЛ ПРИ ТРАНС- И СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Проведено экспериментальное исследование аэродинамических характеристик моделей пар тел на участках разгона и торможения потока при транс- и сверхзвуковых скоростях обтекания. При сверхзвуковых скоростях определена зависимость коэффициента сопротивления модели пары тел от относительного сопротивления переднего тела.

В последние годы в печати появилось много работ (см. [1–10]), посвященных изучению течений, образующихся около пары тел при сверхзвуковом обтекании. В них приведены результаты исследований обтекания и перестройки течения между телами, закономерностей распределений давления и теплового потока по поверхности тела, расположенного в следе, аэродинамического сопротивления пары тел, нульсаций течения в отрывной зоне и т. д. Однако проблема обтекания пары тел очень сложна и до настоящего времени недостаточно изучена. В частности, мало исследованы трансзвуковые режимы обтекания пар тел, влияние изменения скорости потока и сопротивления переднего тела на аэродинамические характеристики пары тел. Изучению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

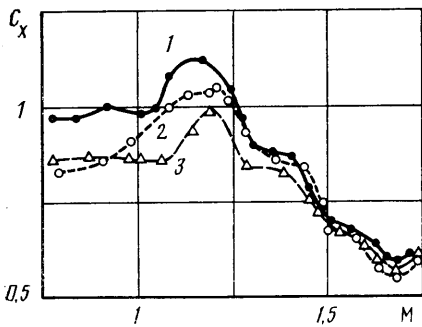
Исследования проведены на моделях пар тел, соединенных стержнем (фиг. 1), в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью в следующем диапазоне чисел M и Re : $0,5 < M \leq 1,7$ и $10^3 \leq Re \leq 1,5 \cdot 10^6$. Число



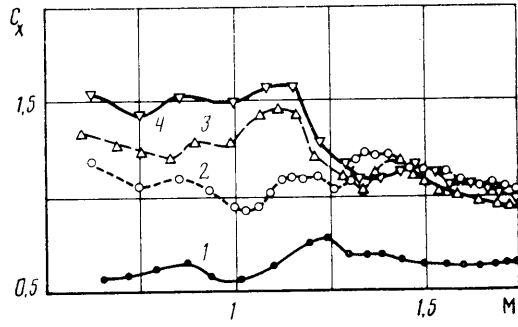
Фиг. 1

Рейнольдса Re вычислено по параметрам невозмущенного потока и диаметру заднего торца. В качестве переднего тела использованы конусы, сферы, цилиндры, а заднего — торцы, размеры которых приведены в таблице, где d_0 — диаметр, h_0 — длина переднего тела (каждому переднему и заднему телу присвоен свой номер). Переднее и заднее тела наворачивались на державки различной длины, которые крепились на однокомпонентных весах. Для обозначения модели пары тел используются два номера и параметр l . Первый номер (арабская цифра) определяет переднее тело, второй (римская цифра) — задний торец, а параметр l — отношение длины стержня между телами к диаметру торца.

В течение пуска режим работы трубы изменялся по числу M либо непрерывно на этапе разгона и торможения потока, либо дискретно. Раз-



Фиг. 2



Фиг. 3

гон и торможение потока производились в течение 10–15 с. При непрерывном изменении режима работы трубы на осциллограмме одновременно с записью силы, действующей на модель, в том же темпе записывалось изменение давления в форкамере трубы, по которому вычислялось значение числа M и скоростной напор q в потоке.

Результаты испытаний после первичной обработки представлены для каждой модели на фиг. 2 в виде графиков зависимости коэффициента сопротивления C_x модели пары тел (1-II, $l=1$) от числа M набегающего потока на этапе разгона (кривая 1), торможения (2) потока и при дискретном изменении числа M (3). Здесь и в дальнейшем при вычислении коэффициента C_x использована площадь торца.

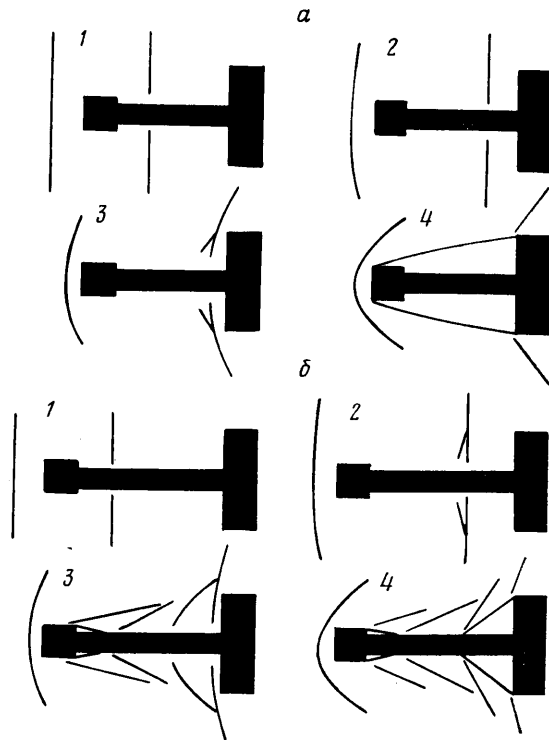
В результате анализа зависимостей $C_x(M)$ различных моделей пар тел установлено, что при сверхзвуковом обтекании ($M \geq 1,5$) величина C_x практически не зависит от скорости изменения режима, а при до- и трансзвуковом обтекании ее влияние на C_x может быть значительным. Несовпадение характеристик C_x модели при разгоне и торможении потока на указанных режимах говорит о том, что имеет место явление гистерезиса. Гистерезис наблюдается и в течении около пары тел, что подтверждают кинограммы картины обтекания модели на участках разгона и торможения потока. Причина возникновения гистерезиса связана, по-видимому, с нестационарностью течения в отрывных зонах при до- и трансзвуковых скоростях обтекания.

Поскольку характер изменения C_x от числа M при разгоне и торможении потока в трубе примерно одинаков (фиг. 2), при анализе влияния параметров на коэффициент сопротивления пары тел ограничимся случаем разгона потока в трубе.

В отличие от зависимостей $C_x(M)$ для тел простой формы (например,

Параметры	Форма тел					
	Сфера			Цилиндр		
d_0 , мм	10,3	20	24,3	10	15	20
h_0 , мм	—	—	—	10	10	10
N	1	2	3	4	5	6

Параметры	Форма тел							
	Конус						Торец	
d_0 , мм	14,8	15	15	20	20	20	20	29,8
h_0 , мм	15	20	25	15	10	25	5	5
N	7	8	9	10	11	12	I	II



Фиг. 4

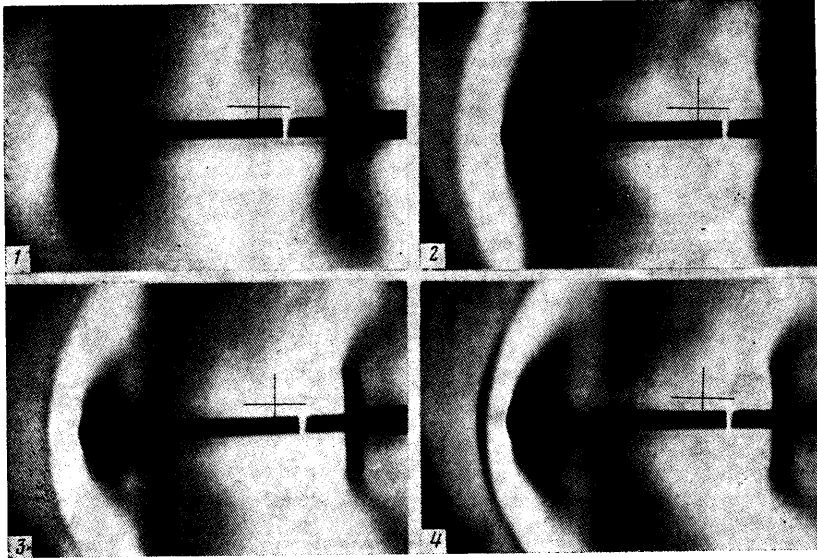
сфер, конусов) зависимости коэффициента сопротивления пары тел от числа M , представленные на фиг. 3 (4-I, $1-l=1,5$; $2-l=2,25$; $3-l=3,75$, $4-l=4,5$), имеют неравномерный характер. Немонотонность изменения C_x связана с сложным характером обтекания пары тел.

Известно, что при сверхзвуковом обтекании пары тел (см., например, [4]) в зависимости от расстояния l между телами возможны два вида отрывных течений. Перестройка одного вида течения в другой происходит при некотором значении параметра l , величина которого l^* называется критическим расстоянием перестройки течения. Картина течения при $l < l^*$ характеризуется отрывом потока с переднего тела, а при $l > l^*$ — отрывом потока со стержня.

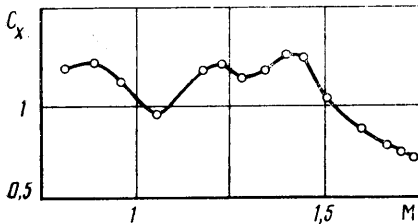
В случае трансзвукового обтекания пары тел картина течения также зависит от расстояния l между телами. В результате анализа кинограмм картины обтекания моделей пар тел установлено, каким образом трансзвуковое течение переходит в сверхзвуковое. Схематически этот переход изображен на фиг. 4 ($a-l < l^*$, $b-l > l^*$).

При $l < l^*$ $1 \leq M \leq 1,1$ вместе с появлением головного скачка уплотнения перед передним телом между телами возникает сверхзвуковая зона с прямым скачком уплотнения ($a, 1$), причем этот скачок колеблется вдоль по потоку. С увеличением числа M до $\sim 1,2$ сверхзвуковая зона смещается к торцу ($a, 2$). При дальнейшем увеличении числа M от $\sim 1,2$ до $1,3$ прямой скачок уплотнения перед задним телом превращается в λ -образный и между телами начинает формироваться сверхзвуковая отрывная зона ($a, 3$). При числах $M \geq 1,5$ ее формирование полностью завершается ($a, 4$). При $l > l^*$, $1 \leq M \leq 1,2$ изменение схемы течения между парой тел примерно такое же, как и в случае $l < l^*$ ($b, 1, 2$). При дальнейшем увеличении числа M в интервале $\sim 1,2-1,3$ за передним телом формируется сверхзвуковое донное течение, а перед торцом — отрывное течение ($b, 3$), формирование которого завершается при $M \sim 1,5$ ($b, 4$).

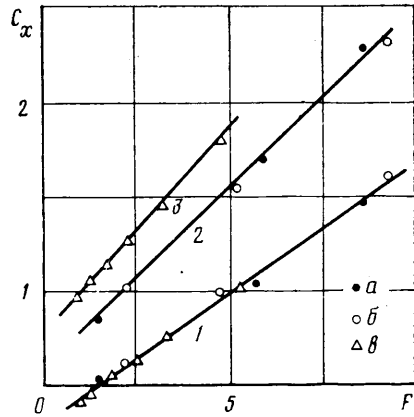
Изменение картины обтекания модели пары тел (например, 2-II, $l=$



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

$=2$ на фиг. 5) сопровождается изменением величины ее коэффициента сопротивления C_x (фиг. 6). На фиг. 5 фото 1 соответствует $M=1,06$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4. Смещению сверхзвуковой зоны с прямым скачком уплотнения к торцу (2) и завершению формирования отрывной зоны перед торцом (4) соответствуют местные максимумы C_x на фиг. 6. Существование второго максимума C_x отмечалось ранее в литературе при исследовании полета пары тел на баллистической установке [8].

При до- и трансзвуковом режимах обтекания с увеличением длины стержня l между телами сопротивление пары тел возрастает (фиг. 3, кривые 1–4), что связано с увеличением вклада торца в сопротивление системы при его удалении из аэродинамической тени. При сверхзвуковом обтекании ($M > 1,5$) с увеличением длины l от $1,5 < l^*$ (1) до $2,25 > l^*$ (2) происходит резкое возрастание (в 1,7–1,8 раза) величины C_x , связанное с перестройкой течения. Дальнейшее же увеличение длины стержня l от 2,25 до 4,5 (кривые 2–4) не приводит к существенному изменению величины C_x модели из-за того, что мало меняется угол раствора отрывной зоны перед торцом.

Рассмотрим влияние переднего тела на сопротивление пары тел при сверхзвуковом обтекании. В результате анализа экспериментальных данных при фиксированном значении числа M для моделей пар тел, у которых длина стержня и диаметр заднего торца постоянны, а передние тела различны, определены зависимости $C_x(F)$ (фиг. 7), где F — отношение силы сопротивления, действующей на изолированное переднее тело F_i , к минимальной силе F_0 из всех F_i для данных испытаний (в данном случае F_0 относится к модели конуса 9, см. таблицу). На фиг. 7 ($M=1,7$) кривая 1 соответствует $l=1,5 < l^*$, а кривые 2, 3 — $l=4,5 > l^*$, точками a обозначены экспериментальные данные для моделей 1-1 — 3-1, точками b — 4-1 — 6-1, а точками c — 7-1 — 12-1. Из приведенных кривых следует, что при $l < l^*$ величина C_x пары тел зависит только от сопротивления переднего тела и не зависит от его формы (1), а при $l > l^*$ зависит еще и от того, отсоединен головной скачок уплотнения от переднего тела (2) или присоединен к нему (3). Причем величина C_x при одинаковых значениях F в случае присоединенного скачка уплотнения больше. Объясняется это тем, что в косом скачке уплотнения потери полного давления меньше, чем в прямом, и поэтому давление на торец со стороны набегающего потока больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charwat A. F., Roos J. N., Dewey Jr. C., Hitz J. A. An investigation of separated flows. Pt 1. The pressure field // J. Aero/Space Sci. 1961. № 6. P. 457—470.
2. Карпов Ю. Л., Семенкевич Ю. П., Черкез А. Я. К расчету отрывного течения между двумя телами // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 3. С. 88—94.
3. Кудрявцев В. Н., Черкез А. Я., Шилов В. А. Исследование сверхзвукового обтекания двух разделяющихся тел // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 2. С. 91—99.
4. Хлебников В. С. Перестройка течения между парой тел, одно из которых расположено в следе другого, при сверхзвуковом обтекании // Уч. зап. ЦАГИ. 1976. Т. 7. № 3. С. 133—136.
5. Хлебников В. С. Осесимметричное обтекание пары тел сверхзвуковым потоком газа // Уч. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9. № 6. С. 108—114.
6. Головачев Ю. П., Леонтьева Н. В. Численное исследование обтекания затупленного тела, расположенного в области сверхзвукового следа: Препринт № 918. Л.: Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе АН СССР, 1984. 35 с.
7. Запьягаев В. И. Исследование пульсаций в отрывной зоне свободной каверны при сверхзвуковой скорости потока // ПМТФ. 1985. № 6. С. 50—58.
8. Белов В. Е., Хлебников В. С., Цыганов П. Г. Сопротивление пары тел при сверхзвуковых скоростях полета // Уч. зап. ЦАГИ. 1985. Т. 16. № 3. С. 114—117.
9. Белов И. А., Дементьев И. М., Исаев С. А. и др. Моделирование сверхзвукового обтекания тел вращения с передней срывной зоной: Препринт № 1033. Л.: Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе АН СССР. 1986. 58 с.
10. Хлебников В. С. Экспериментальное исследование сверхзвукового трехмерного отрывного течения между плоским насадком и сферой // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 5. С. 166—170.

Москва

Поступила в редакцию
15.XI.1988