

УДК 533.6.011:532.529.5

© 1992 г.

В. А. ЛАШКОВ

## АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРА В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

Статья посвящена экспериментальному исследованию аэродинамического сопротивления кругового цилиндра при поперечном обтекании потоком газозвеси. Основные закономерности сопротивления цилиндра при обтекании его воздухом достаточно хорошо изучены [1, 2]. В [3] экспериментально показано, что наличие небольших количеств твердых частиц в потоке газа может приводить к значительному изменению аэродинамических свойств тела. Выбор цилиндра в качестве объекта исследования обусловлен тем, что он является классическим телом, результаты исследования которого можно в определенном смысле экстраполировать на другие тела, например крыловой профиль.

1. Экспериментальные исследования проводились на установке, которая представляет собой аэродинамическую трубу баллонно-эжекторного типа [4]. Дозатор твердой фазы установки позволяет управлять расходом компонента через сопло в диапазоне 0,01–2,7 кг/с. Режим работы дозатора задается требуемой концентрацией  $K$  твердой фазы в потоке, которая определяется как отношение массового расхода дисперсной фазы к массовому расходу несущей среды.

В качестве твердой фазы использовались стандартные (ГОСТ 3647-80) электрокорундовые микро- и шлифпорошки, которые состоят из частиц, имеющих форму острозернистых продолговатых обломков, с плотностью материала  $\rho_p = 4000$  кг/м<sup>3</sup>. Применение таких порошков с достаточно узкой функцией распределения частиц по размерам позволяет изучать влияние размера частиц на аэродинамические характеристики исследуемого тела.

Силовые нагрузки, действующие на модель, которая представляла собой цилиндр с отношением длины к диаметру  $L/D=2$ , измерялись с помощью аэродинамических тензозвесов. Электрический сигнал с выхода тензоусилителя поступал в ЭВМ, которая кроме обработки поступающей информации осуществляла управление вводом и выводом модели в поток. Использование ЭВМ позволило до минимума сократить время опыта, что важно при проведении исследований в двухфазных высокоскоростных потоках, обладающих значительной эрозионной способностью.

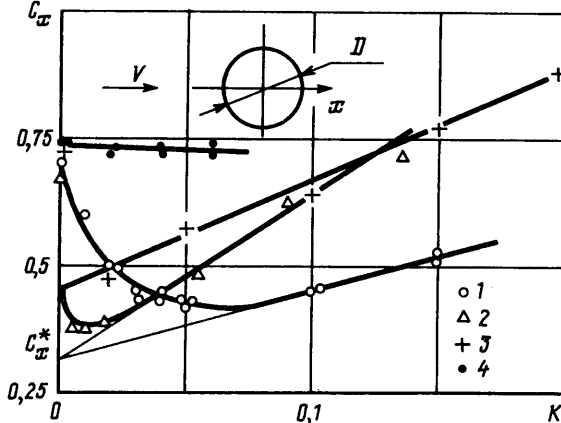
Измерение скорости и плотности твердой фазы в том месте потока, где устанавливались модели, осуществлялось лазерными оптическими методами [5]. Исследование параметров рабочего двухфазного потока показало, что неравномерность по миделевому сечению модели профиля скорости несущей фазы – воздуха не хуже 2–3%, скорости твердых частиц не более 3–4%, а плотности дискретной фазы – 8–10%.

2. Эксперименты обнаружили, что в диапазоне изменения числа Рейнольдса  $Re = (0,6-3) \cdot 10^5$  аэродинамическое сопротивление цилиндра может значительно (в некоторых случаях более чем в 2 раза) уменьшаться при введении в поток воздуха весьма малых количеств твердой фазы. Число Рейнольдса подсчитывалось по параметрам несущей фазы  $Re = \rho V D / \mu$ , где  $\rho$ ,  $V$ ,  $\mu$  – соответственно плотность, скорость и коэффициент динамической вязкости воздуха.

На фиг. 1 представлены характерные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления цилиндра от концентрации дискретной фазы в потоке. Коэффициент  $C_x$  определяется как  $C_x = 2X / \rho V^2 S$ , где  $X$  – сила сопротивления;  $S$  – площадь миделевого сечения модели. Экспериментальные точки на фиг. 1 соответствуют следующим значениям среднего массового размера частиц твердой фазы  $d$  в мкм и числу Рейнольдса  $Re$ :

1 — (109,  $1,41 \cdot 10^5$ ); 2 — (44,  $1,53 \cdot 10^5$ ); 3 — (16,  $1,15 \cdot 10^5$ ); 4 — (2,  $1,30 \cdot 10^5$ ).

При увеличении концентрации твердой фазы в потоке, состоящей из относительно крупных частиц (точки 1), коэффициент  $C_x$  сначала плавно уменьшается, а затем, начиная с некоторого значения  $K$ , линейно растет. Область изменения параметра  $K$ , в которой наблюдается падение  $C_x$ , зависит от размера  $d$  частиц твердой фазы: чем мельче частицы, тем уже упомянутая область. Если использовались порошки с размерами частиц менее 40 мкм, то минимально возможная концентрация, которую был способен обеспечить дозатор твердой фазы, сразу приводила к резкому падению коэффициента  $C_x$  (см. точки 2, 3). И наконец, введение в поток воздуха очень мелких частиц, точки 4, не оказывало сколько-нибудь заметного влияния на сопротивление модели.

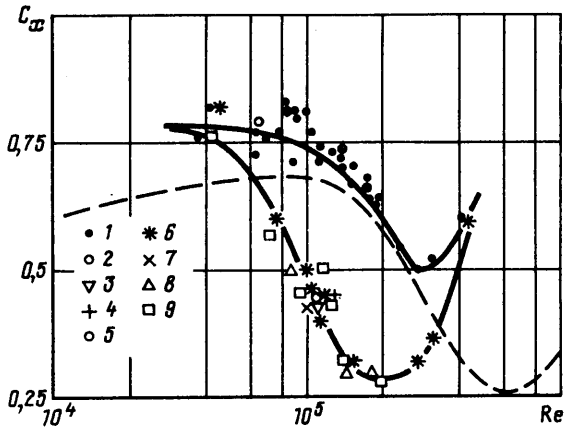


Фиг. 1

Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от концентрации можно представить как суперпозицию двух процессов, проходящих с увеличением параметра  $K$ : падение  $C_x$  при  $K$ , близких к нулю, и линейный рост пропорциональный концентрации твердой фазы в потоке. Величину отрезка, отсекаемого на оси ординат прямой, описывающей линейную зависимость  $C_x$  от  $K$ , обозначим  $C_x^*$ . Очевидно,  $C_x^*$  определяет минимальное значение коэффициента  $C_x$ , которое достигается с увеличением  $K$ , если отсутствует процесс линейного роста. Наклон прямых, которыми обозначен на фиг. 1 рост коэффициента  $C_x$  с увеличением концентрации  $K$ , зависит от размера частиц твердой фазы. Как показали исследования, этот наклон при использовании в качестве твердой фазы порошков с частицами, имеющими путь релаксации, намного превышающий характерный размер модели (число Стокса  $St \gg 1$  или в данном случае частицы с  $d > 20$  мкм), в основном определяется скоростным напором потока дискретной фазы  $\rho_s U^2$ , где  $\rho_s$ ,  $U$  — плотность и скорость твердой фазы. С уменьшением размера частиц газовая фаза в возмущенной зоне течения около модели оказывает все большее влияние на параметры движения дискретной фазы. Количество частиц, контактирующих с поверхностью тела, становится меньше, и может возникнуть такая ситуация, когда все частицы увлекаются газом и ни одна из них не соударяется с моделью и, значит, не передает ей свой импульс. Очевидно, этим объясняется поведение точек 4: коэффициент  $C_x$  не зависит от  $K$ .

На фиг. 2 экспериментальными точками 1 показано влияние числа Рейнольдса на коэффициент  $C_0$  цилиндра в потоке чистого воздуха. Здесь же для сравнения нанесена пунктиром «стандартная» зависимость коэф-

коэффициента аэродинамического сопротивления цилиндра длиной два калибра при поперечном обтекании несжимаемым воздухом от числа Рейнольдса [1]. Можно отметить удовлетворительное совпадение между точками 1 и стандартной кривой. Точность измерения коэффициента сопротивления в диапазоне изменения числа  $Re = (0,6-2,5) \cdot 10^5$ , где и проводились основные опыты, была не хуже 5%. Вследствие физических возможностей аэродинамической трубы постановка экспериментов при числах Рейнольдса, превышающих указанный диапазон, была связана или со значительной потерей точности (более 8%), когда размеры модели превышали рабочее ядро потока, или с выходом в область больших скоростей несущей фазы (более 100 м/с), когда становятся ощутимыми эффекты сжимаемости газа. Увеличение числа Маха потока приводит к росту коэффициента сопротивления [6]. Этим можно объяснить значительное отличие полученных значений  $C_x$  от стандартной зависимости при  $Re > 3 \cdot 10^5$ . Погрешность



Фиг. 2

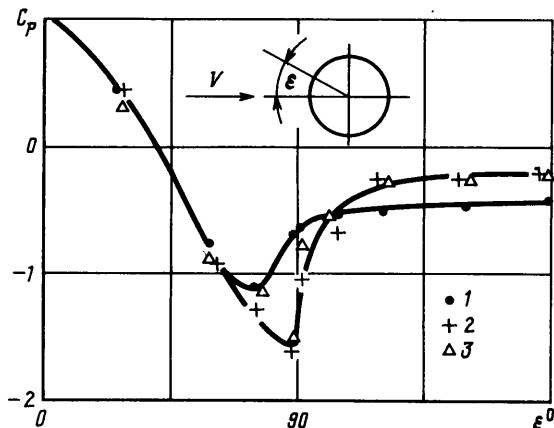
измерения коэффициента сопротивления при числах  $Re < 0,6 \cdot 10^5$  была около 10% и определялась рабочими характеристиками используемых тензочувствителей.

Точками 2-9 на фиг. 2 нанесены величины  $C_x^*$ , полученные при обтекании модели потоком газозвеси с частицами, имеющими размеры ( $d$  мкм) 2; 16; 23; 32; 44; 88; 109; 138 соответственно.

Эксперименты зафиксировали, что на величину  $C_x^*$  влияет режим обтекания модели (число Рейнольдса) и размер  $d$  частиц твердой фазы. Введение в поток воздуха частиц с размером  $d > 15$  мкм приводило к уменьшению по сравнению с опытами на чистом воздухе критического числа Рейнольдса  $Re_*$ , при котором наблюдался «кризис» сопротивления модели. Следует заметить, что аналогичное явление наблюдалось и при исследовании сопротивления «бесконечного» цилиндра, а также сферы.

Уменьшение числа  $Re_*$  может быть достигнуто увеличением степени турбулентности потока [2]. Если оценивать по эффективности воздействия, то введение твердой фазы в поток равносильно увеличению степени турбулентности в чистом воздухе с 1÷1,5 до 6÷8%. Однако в [7, 8] утверждается, что интенсивность турбулентности газовой фазы в двухфазной струе уменьшается с ростом концентрации примеси. Это косвенно подтверждается тем фактом, что при проведении исследований введение порошка в поток воздуха приводило к снижению уровня акустических шумов экспериментальной установки.

Эксперименты также показали, что присутствие примеси в потоке воздуха смещает точку отрыва пограничного слоя на модели. На фиг. 3



Фиг. 3

представлены результаты исследований распределения давления на цилиндре, когда в качестве твердой фазы использовался порошок с размером частиц  $d=44$  мкм. Точками 1 показано распределение давления на модели в потоке чистого газа, а точки 2 и 3 соответствуют концентрации дискретной фазы в потоке 0,02 и 0,05 соответственно. При введении в поток твердых частиц ( $K=0,02$ ) давление на лобовой поверхности ( $\epsilon=80\div 90^\circ$ ) уменьшалось, давление в донной области ( $\epsilon>110^\circ$ ) увеличивалось, точка отрыва потока смещалась с  $\epsilon=80$  на  $\epsilon=90\div 95^\circ$ . Дальнейший рост концентрации примеси не приводил к сколько-нибудь заметному изменению распределения давления на цилиндре (точки 2 и 3). Визуальное обследование модели после опытов также позволило определить место отрыва потока. На донной поверхности за точкой отрыва  $\epsilon>92,5^\circ$  наблюдались осажденные мелкие частицы.

Таким образом, падение сопротивления цилиндра при введении твердой фазы в поток воздуха, очевидно, связано с процессами, происходящими в пограничном слое на поверхности обтекаемого тела. Установившееся движение воздуха в пограничном слое в некоторые моменты времени нарушается налетающей частицей. Возмущающее воздействие частицы может приводить к переходу ламинарного режима течения в турбулентный, что вызывает смещение точки отрыва вниз по потоку и, значит, улучшает условия обтекания тела. Ясно, что частица может вызвать смену режима течения в пограничном слое не на всей поверхности тела, а только в некоторой небольшой области. Причем надо иметь в виду, что возмущение от частицы кратковременно. Переход к новому установившемуся течению происходит не сразу, а в связи с действием вязких сил требует некоторого конечного времени. Падение сопротивления цилиндра в потоке газозвеси зависит от того, какую долю времени и на какой части поверхности существует турбулентный режим течения.

Основу механизма возмущения твердой частицей пограничного слоя составляет скоростное скольжение фаз, так как вихревое течение в следе за частицей должно способствовать интенсификации перемешивания между вязкой и потенциальной областями течения. Поэтому мелкие частицы (число Стокса  $St\ll 1$ ), имеющие незначительное скоростное скольжение, не изменяют ламинарный режим течения несущей фазы в пограничном слое (см. фиг. 2, точки 2). Крупные частицы (число Стокса  $St\gg 1$ ) обладают значительной инерцией, поэтому их скорость движения может существенно отличаться от скорости газа. В этом случае за частицей возникает вихревая дорожка, стимулирующая переход ламинарного режима течения пограничного слоя в турбулентный. С увеличением кон-

центрации твердой фазы пропорционально растет счетная плотность частиц. Соответственно возрастает количество возмущенных областей в пограничном слое, и сопротивление цилиндра падает до тех пор, пока на всей поверхности не реализуется турбулентный отрыв.

При одной массовой концентрации  $K$  счетная плотность мелких частиц выше, чем крупных. Поэтому дискретная фаза, состоящая из более мелких частиц (но  $St \gg 1$ ), приводит к скорейшему падению сопротивления.

Частица может вызвать смену режима течения в пограничном слое только тогда, когда запас устойчивости ламинарного пограничного слоя недостаточен. Так, введение примеси в поток при  $Re < 0,4 \cdot 10^5$  не вызывало уменьшения сопротивления цилиндра (см. фиг. 2). С другой стороны, при  $Re > 4 \cdot 10^5$ , когда уже реализуется турбулентный отрыв пограничного слоя, присутствие твердой фазы в потоке не может изменить условия отрыва, поэтому падение сопротивления модели в этом случае не фиксировалось.

3. Представим силу аэродинамического сопротивления цилиндра в потоке газозвеси в виде

$$X = X_G + X_s; \quad X_G = \frac{1}{2} C_G \rho V^2 S; \quad X_s = \frac{1}{2} C_s \rho_s U^2 S \quad (3.1)$$

Здесь  $X_G$  — сила сопротивления, вызванная воздействием на тело только газовой фазы;  $X_s$  — сила сопротивления от ударов частиц о поверхность;  $C_G, C_s$  — соответственно коэффициенты аэродинамических сил сопротивления.

Если правую и левую части уравнения (3.1) поделим на  $\rho V^2 S/2$ , то получим

$$C_x = C_G + C_s K (U/V) \quad (3.2)$$

Рассмотрим, от чего зависят слагаемые в уравнении (3.2).

Силовое воздействие твердых частиц на тело определяется характером течения смеси около тела и механизмом передачи импульса от частиц к поверхности. Изменение параметров движения твердой фазы в возмущенной зоне течения газозвеси около тела по сравнению с невозмущенной зависит от числа Стокса  $St = d^2 \rho_p V / (18 \mu D)$  и величины  $\Phi = Re_0 / St$ . Здесь  $Re_0 = \rho d V / \mu$  — характерное число Рейнольдса частицы.

С уменьшением числа  $St$  и увеличением  $\Phi$  скорость соударения частицы с поверхностью тела падает. Направление движения частицы перед ударом все больше отклоняется от своего первоначального невозмущенного направления. Результаты исследований инерционного осаждения частиц на поверхность цилиндра можно найти, например, в [9, 10].

Передача импульса частиц телу определяется величиной коэффициентов восстановления нормальной  $a_n$  и касательной  $a_t$  составляющих скорости частиц при ударе о поверхность. Коэффициенты  $a_n$  и  $a_t$  в основном зависят от угла и скорости падения частиц на поверхность тела [11]. Размер частиц не влияет на коэффициенты восстановления скорости. В то же время можно утверждать, что на величину  $a_n$  и  $a_t$  влияют физико-механические свойства материалов поверхности и частиц. Если не пренебрегать эффектами, возникающими при образовании «защитного» слоя из отразившихся от тела частиц, то  $C_s = f(St, \Phi, a_n, a_t, K)$ .

В случае, когда можно пренебречь эффектом защитного слоя и влиянием газовой фазы на параметры движения дискретной ( $St \gg 1, K \approx 0$ ), по известным для частиц из электрокорунда и стальной поверхности коэффициентам  $a_n$  и  $a_t$  можно определить наибольшее значение коэффициента  $C_s = 1,9 \div 2,0$  для цилиндра.

Когда на силу сопротивления от воздействия газовой фазы не влияет параметр  $K$  ( $C_G = \text{const}$ ), зависимость коэффициента  $C_x$  (см. формулу

(3.2)) от концентрации носит линейный характер, а угол наклона прямой определяется величиной  $C_0 U/V$ . В [12] представлены результаты, которые иллюстрируют такую ситуацию.

Результаты исследования коэффициента аэродинамического сопротивления цилиндра  $C_0$  в потоке чистого воздуха можно найти в [1]. Как и в случае со сферой (в [6] представлен большой объем данных по исследованию сопротивления сферы), коэффициент  $C_0$  цилиндра зависит от чисел Рейнольдса и Маха.

В двухфазном потоке твердые частицы вносят нестационарный момент в течение пограничного слоя на теле. Соотношение между локальным и конвективным ускорениями определяется величиной числа Струхала  $Sh=fD/V$ , где  $f$  — характерная частота возмущений течения. Частоту  $f$  определим как количество твердых частиц, падающих на характерную площадь  $D^2$  в единицу времени, без учета влияния газовой фазы на параметры движения твердой

$$f = \frac{6K\rho VD^2}{\pi\rho_p d^3} \quad (3.3)$$

Так как число частиц, падающих на тело, зависит от параметров  $St$  и  $\Phi$ , то число Струхала можно представить в виде

$$Sh=6K\rho D^3 F(St, \Phi)/\pi\rho_p d^3$$

Здесь  $F(St, \Phi)$  — функция, учитывающая влияние газовой фазы на параметры движения твердой. Значение функции  $F$  принадлежит диапазону  $0 \leq F \leq 1$ . В первом приближении функцию  $F$  можно заменить коэффициентом осаждения [9].

Таким образом, коэффициент  $C_G$  зависит от следующих характеристических параметров:  $C_G=f(Re, M, Sh, St, \Phi, K)$ .

Для крупных частиц ( $St \gg 1$ ), когда  $F \approx 1$ , по результатам экспериментальных исследований получена эмпирическая формула, с помощью которой с ошибкой не более 10% можно описать коэффициент

$$C_G=C_0 \left\{ 1-0,55 \left( \frac{Re}{1,6 \cdot 10^5} \right)^{-1,831 \ln(Re/1,6 \cdot 10^5)} [1 - \exp(-0,25 Sh^{0,67} K^{0,33})] \right\}$$

Приведенная зависимость для  $C_G$  охватывает следующие диапазоны изменения параметров:  $0,4 \cdot 10^5 < Re < 4 \cdot 10^5$ ;  $0 < Sh < 7 \cdot 10^5$ ;  $10 < St < 1,5 \cdot 10^3$ ;  $M < 0,3$ ;  $K < 0,3$ .

Результаты экспериментального исследования позволяют сделать следующие выводы. Введение твердой примеси в поток газа на режимах обтекания, близких к  $Re=10^5$ , приводит к значительному (примерно в 2 раза) уменьшению сопротивления цилиндра. Падение сопротивления тела связано с дестабилизирующим воздействием частиц на течение в пограничном слое. Определены основные параметры, которые влияют на сопротивление тела в потоке газозвеси. Предложена эмпирическая формула.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страхович К. И. Прикладная газодинамика. Л.; М.: ОНТИ, 1937. 300 с.
2. Графский И. Ю., Казакевич М. И. Аэродинамика плохообтекаемых тел / Учеб. пособие. Днепропетровск, 1983.
3. Бакум Б. И., Домбровская Т. Н., Лагутин В. И. Влияние запыленности потока на результаты испытаний в гиперзвуковых аэродинамических трубах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 4. С. 187–189.
4. Баланин Б. А., Трахов Е. П. Экспериментальная установка для исследования высокоскоростных двухфазных течений // Газодинамика и теплообмен. Вып. 6. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. С. 32–41.

5. *Баланин Б. А., Лашков В. А., Меладзе С. А. и др.* Измерение параметров двухфазных потоков лазерными методами // Вестн. Ленинград. ун-та. Сер. 1. 1986. Вып. 1. С. 71–77.
6. *Бейли, Хайт.* Коэффициент сопротивления сферы в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса // Ракетная техника и космонавтика. 1972. № 11. С. 56–62.
7. *Модарресс Д., Тань Х., Эльхобаши С.* Использование лазерного анемометра при исследовании двухфазной турбулентной струи // Аэрокосмическая техника. 1984. № 12. С. 83–91.
8. *Лаатс М. К., Фришман Ф. А.* Разработка методики и исследование интенсивности турбулентности на оси двухфазной турбулентной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 2. С. 153–157.
9. *Соу, Шао-Ле.* Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
10. *Фукс Н. А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.
11. *Табаков В., Мейлэк М. Ф., Хамед А.* Измерение лазером характеристик отскокивания твердых частиц при соударении их с поверхностью из алюминиевого (2024) и титанового (6Al–4V) сплавов // Аэрокосмическая техника. 1987. № 12. С. 58–64.
12. *Баланин Б. А., Лашков В. А., Трахов Е. П.* Особенности аэродинамического сопротивления в двухфазных потоках // Газодинамика и теплообмен. Вып. 6. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. С. 19–26.

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию  
4.III.1991