

ВЛИЯНИЕ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПОТОКА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ В ГИПЕРЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

Б. И. БАКУМ, Т. Н. ДОМБРОВСКАЯ, В. И. ЛАГУТИН

(Москва)

Рассмотрены природа и характер влияния запыленности рабочего потока гиперзвуковых аэродинамических труб на результаты аэродинамических испытаний. Показано, что запыленность вызывает увеличение силы лобового сопротивления тонких моделей и, наоборот, уменьшение силы лобового сопротивления и коэффициента демпфирующего продольного момента затупленных моделей.

В известных работах [1, 2] влияние запыленности на результаты испытаний объясняется по следующей упрощенной схеме: частицы перед соударением с моделью имеют скорость, равную скорости потока, а их влияние сводится к передаче запасенного ими количества движения в виде импульса силы. Однако эта схема не всегда пригодна. Так, в работе [3] показано, что в гиперзвуковых аэродинамических трубах вследствие отставания частиц от потока может происходить его турбулизация и искажаться характер обтекания затупленных моделей. В работе [4] и других показано, что при соударении со скоростью $1 \div 10$ км/сек и более импульс силы может быть больше количества движения ударяющейся частицы. Рассмотрим факторы, определяющие влияние запыленности на результаты аэродинамических испытаний.

Дополнительный импульс силы.
Возьмем случай обтекания тела с плоским торцом. Соударение частиц с торцом приводит к появлению импульса силы [4]

$$I_s = mW_1(1 + 0.6W_1/W_s) \quad (1)$$

Здесь m — масса частиц пыли, сталкивающейся с моделью, W_1 — скорость соударения, W_s — скорость соударения, необходимая для разрушения связей кристаллической решетки или мелкого дробления материала частиц и модели (для металлов $W_s \approx 2000$ м/сек [4]).

Используя закон сопротивления Ньютона, можно описать силы, действующие на модель со стороны частиц и чистого газа соответственно уравнениями

$$P_1 = \rho_2 z W_2 W_1 (1 + 0.6W_1/W_s) F^\circ, \quad P_2 = \rho_2 W_2^2 F^\circ \quad (2)$$

Здесь ρ_2 , W_2 , W_1 и z — соответственно плотность и скорость газа, скорость частиц и весовой уровень запыленности набегающего потока, F° — площадь лобовой поверхности.

Вследствие динамического отставания частиц z увеличивается в сравнении с уровнем запыленности газа в форкамере z_0 [5] и при $z_0 \ll 1$

$$z = z_0 W_2 / W_1 \quad (3)$$

Из уравнений (2) — (3) получим, что в рассматриваемом случае

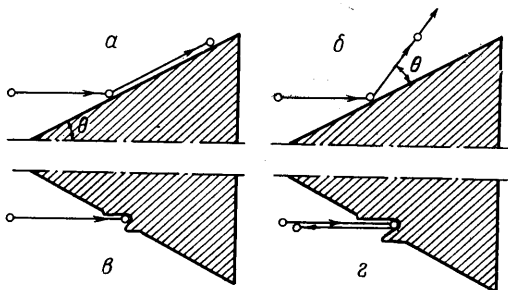
$$p = P_1 / P_2 = z_0 (1 + 0.6W_1 / W_s) \quad (4)$$

При обтекании острого конуса с углом полураствора θ , установленного под нулевым углом атаки, лобовая сила в соответствии с законом сопротивления Ньютона равна

$$P_2 = \rho_2 W_2^2 F \sin^2 \theta \quad (5)$$

где F — площадь поверхности конуса.

Что касается силы, действующей со стороны пыли на конус, то ее величина будет определяться характером взаимодействия частиц с моделью. Нетрудно показать, что в четырех возможных случаях соударения (неупругом по схеме Ньютона (фиг. 1, а), упругом (фиг. 1, б), соударении с «прилипанием» частицы к модели без выброса материала из кратера, образующегося на поверхности модели (фиг. 1, в) и соударении с «твердым взрывом», когда импульс силы увеличивается согласно урав-



Фиг. 1

нению (1) величина p описывается соответственно следующими уравнениями:

$$p = z_0, \quad p = 2z_0, \quad p = \frac{z_0}{\sin^2 \theta}, \quad p = \frac{z_0}{\sin^2 \theta} \left(1 + 0.6 \frac{W_1}{W_*} \right) \quad (6)$$

Из сравнения уравнений (4) и (6) видно, что наибольшее влияние указанный фактор может оказывать на тонкие тела.

Искажение характера обтекания. При испытаниях затупленных моделей в запыленном рабочем потоке гиперзвуковых аэродинамических труб отошедший скачок уплотнения под действием следов отстающих частиц может искажаться, принимая форму «жидкого» конуса, характерную для обтекания тел с иглой (фиг. 2). Оценить воздействие этого фактора расчетным путем довольно трудно, так как для этого необходимо знать размеры, форму, продолжительность существования и частоту возникновения жидких конусов, а также влияние нестационарности процесса обтекания вследствие чередующихся появлений и исчезновений конусов. При обтекании тонких тел искажений характера обтекания не наблюдается и поэтому этот фактор не должен оказывать влияния на результаты их испытаний.

Турбулизация потока. Вследствие динамического отставания частиц происходит турбулизация набегающего потока [3] и, возможно, пограничного слоя на модели. Оценить влияние пылевой турбулизации, которая может приводить, например, к ускорению перехода, смещению точки перехода и т. д., сложно. Можно лишь ожидать, что влияние этого фактора является незначительным, так как при гиперзвуковом обтекании сопротивление трения обычно мало в сравнении с волновым сопротивлением.

Экспериментальное исследование влияния запыленности было проведено в гиперзвуковой аэродинамической трубе при уровне запыленности рабочего потока, искусственно увеличенного путем засыпки в форкамеру частиц Al_2O_3 с размером зерен 5–7 мкм. Параметры набегающего потока соответствовали $M = 10–15$ и $Re \approx 10^6$ (характерный размер — диаметр мишени модели); обычный уровень запыленности потока трубы равнялся $\approx 0.05\%$.

Исследовались коэффициент лобового сопротивления c_x и коэффициент демпфирующего продольного момента $m_z^{\dot{\alpha}} + m_z^{\omega z}$. Величина c_x определялась с помощью внутримодельных тензочувствительных датчиков, $m_z^{\dot{\alpha}} + m_z^{\omega z}$ — методом свободных колебаний [9].

Ожидаемое увеличение силы лобового сопротивления сферы за счет передачи кинетической энергии при $z_0 \approx 2\%$ согласно оценке, сделанной по уравнению (4), равнялось $3 \div 5\%$. Однако в действительности наблюдалось уменьшение силы лобового сопротивления на $\approx 20\%$, что происходило вследствие преобладающего влияния жидких конусов, количество которых в этих экспериментах было на порядок больше,

чем обычно. Еще более существенным (также из-за искажений формы скачка (фиг. 2)) оказалось влияние запыленности на демпфирующие характеристики сегментально-конического тела (величина $m_z^{\dot{\alpha}} + m_z^{\omega z}$ изменилась в два раза).

Весовые испытания острого конуса ($\theta = 11^\circ$), как и ожидалось, показали, что вследствие появления дополнительного импульса силы при обтекании запыленным потоком измеренное значение коэффициента лобового сопротивления конуса возрастает. Приведем полученные при этом значения p и сравним их с расчетом (вверху — при угле атаки $\alpha = 0$, внизу — при $\alpha = 10^\circ$).



Фиг. 2

Эксперимент	(фиг. 1, а)	Уравнение (6)		(фиг. 1, з)
		(фиг. 1, б)	(фиг. 1, в)	
0.15	0.008	0.016	0.22	0.33
0.03	0.008	0.016	0.063	0.1

Как видно, наилучшее совпадение получается при расчете по схеме, представленной на фиг. 1, а.

Исследование коэффициента демпфирующего продольного момента острого конуса при уровне запыленности $z_0 \approx 0,3\%$ не выявило отличий (в пределах погрешности измерений) от обычных испытаний ($z_0 \approx 0,05\%$) и от расчетных данных.

В проведенных испытаниях влияние пылевой турбулизации потока на аэродинамические характеристики не обнаружилось, так как этому фактору в тех случаях, когда он мог оказать влияние, обязательно сопутствовало, по-видимому, более существенное влияние других факторов.

Поступило 4 XI 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Техника гиперзвуковых исследований. М., «Мир», 1964.
2. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях. М., «Машиностроение», 1965.
3. Бакум Б. И. Пылевая турбулизация рабочего потока в гиперзвуковом сопле. Изв. СО АН СССР, Сер. техн. н., 1969, № 8, вып. 2, стр. 32—35.
4. Станюкович К. П. Элементы теории удара твердых тел с большими (космическими) скоростями. Искусственные спутники Земли, 1960, вып. 4, стр. 86—117.
5. Progress in Astronautics and Rocketry, vol. 6. Detonation and Two — Phase Flow, Acad. Press, N. Y., 1962, p. 117.
6. Белоцерковский С. М., Скрипач Б. К., Табачников В. Г. К определению коэффициентов вращательных производных в аэродинамических трубах. Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, 1964, № 3.

О ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ДВУХЛИНЕЙНЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ДРЕНАЖАМ В ДВУХСЛОЙНЫХ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А. Ж. МУФТАХОВ

(Челябинск)

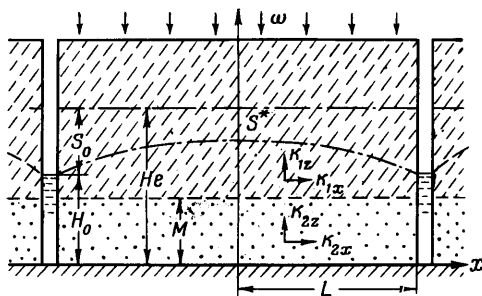
Рассматривается задача о нестационарной фильтрации подземных вод со свободной поверхностью к двухлинейному совершенному дренажу в двухслойном водоносном пласте. Приводятся зависимости для определения понижения уровня в междренном пространстве, являющегося основным критерием эффективности такого дренажа.

Вопросы неустановившейся фильтрации подземных вод к двухлинейным и кольцевым горизонтальным дренажам в двухслойных водоносных пластах рассматривались главным образом в гидравлической постановке при ряде упрощающих допущений. Одни исследователи задачу решают путем использования потенциала Гиринского [1—3], другие считают, что в верхнем слабопроницаемом слое фильтрация воды

происходит в вертикальном направлении, а в нижнем, более проницаемом слое — только в горизонтальном [4].

В то же время правомерность применения этих допущений должного обоснования не нашла. В практике осушения двухслойные пласты встречаются очень часто, поэтому ниже рассматривается вопрос о фильтрации подземных вод к двухлинейным совершенным горизонтальным дренажам в двухслойных водоносных пластах.

Гидродинамическая схема рассматриваемой задачи представлена на фигуре. Считаем, что уровень воды в дрене поддерживается в пределах верхнего слоя. Пусть в общем случае водоносные породы обладают вертикальной фильтрационной анизотропией. Тогда при



воды в дрене поддерживается в пределах верхнего слоя. Пусть в общем случае водоносные породы обладают вертикальной фильтрационной анизотропией. Тогда при