

УДК 533.6.011.5

## СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛОСКОГО КЛИНА В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

БАЛАНИН Б. А., ЛАШКОВ В. А.

Вопросы силового воздействия двухфазных потоков (газ — твердые частицы) все в большей степени приобретают практический интерес. Они особенно актуальны в химической технологии, в нефтегазоносных системах, где силовое и эрозионное воздействия потоков резко снижает ресурс оборудования.

Теоретическое рассмотрение этих вопросов для сверхзвуковых течений наталкивается на существенные принципиальные трудности, связанные с отсутствием информации о процессе передачи импульса к телу от твердых частиц. В случае же дозвуковых течений появляются дополнительно и трудности в расчетах обтекания двухфазным потоком. Отсюда очевидно необходимость широких исследований для построения физических картин взаимодействия и для накопления экспериментальных данных.

В данной работе исследовалось аэродинамическое сопротивление плоского клина в дозвуковом двухфазном потоке, но по сравнению с работой [1] особое внимание было обращено на влияние крупности частиц. Подробно исследованы зависимости сил и аэродинамических коэффициентов от концентратов от концентрации твердой фазы, угла раствора клина и размера частиц. Установлено, что зависимость коэффициентов сопротивления от размера частиц имеет место только при размерах частиц меньших 30 мкм.

1. В качестве экспериментальной установки использовалась аэродинамическая труба баллонно-эжекторного типа, оснащенная дозатором твердой фазы, который обеспечивал подачу порошка с расходом  $Q_T=0-2,7$  кг/с, что давало возможность при средней скорости газовой фазы в 200 м/с получать среднемассовую концентрацию в струе в пределах  $K=0-0,3$ . Устройством, формирующим двухфазный поток, являлась труба диаметром 70 мм и длиной 4,5 м, которая была достаточна для получения полностью стабилизированного течения, т. е. получения минимального отставания частиц от газа. Специальных мер для улучшения процесса смешения твердой фазы с газовой не предпринималось. В связи с тем, что проходное сечение трубы изменялось в процессе работы из-за весьма интенсивной эрозии, перед каждым экспериментом проводилась тарировка установки по средней скорости газовой фазы.

На выходе из установки было установлено очистное устройство, в котором пла очистка потока от частиц в «кипящем» слое воды. Подробно экспериментальная установка описана в работе [2]. Для измерений скорости частиц использовался лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС), созданный на основе аргонового лазера и интерферометра Фабри — Перо, а для измерения распределения концентрации твердой фазы — лазерный измеритель концентрации, аналогичный описанному в работе [3].

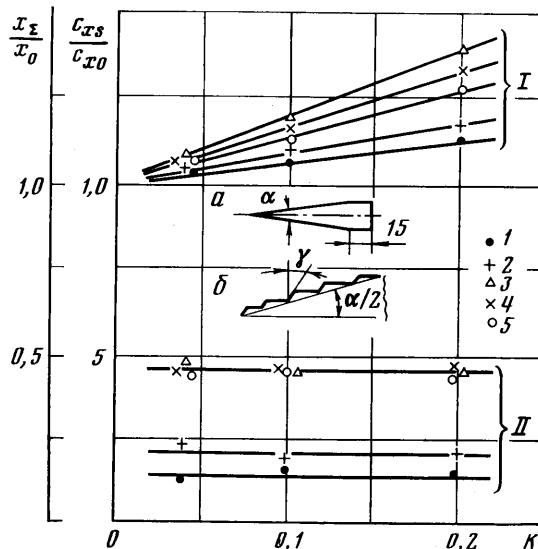
В качестве твердой фазы использовались электрокорундовые микро- и шлифпорошки, состав которых и функция распределения частиц по размерам соответствовали ГОСТ 3647-71. Среднемассовый размер используемых марок порошков составлял  $d_s=16,23, 32,44$  и 88 мкм, а плотность  $\gamma_p=3,9$  г/см<sup>3</sup>. Используемые порошки обладают высокой степенью однородности по физическим свойствам. Основная фракция  $d_s$  составляет для них по весу не менее 50%. Кроме того, они выпускаются промышленностью в значительных количествах, что также весьма важно, имея в виду их большой расход в аэродинамическом эксперименте. Необходимость использования частиц с узкой функцией распределения по размерам диктуется также желательным увеличением точности измерения скорости твердой фазы с помощью ЛДИС, где измеряется некоторая средняя скорость в измерительном объеме ( $\sim 1$  мм<sup>3</sup>), а частицы разных размеров имеют разные скорости, что ведет к увеличению ширины спектра.

В качестве моделей использовались плоские клинья с углами при вершине  $\alpha=10, 20, 40, 60, 90, 120, 150$  и 180°. Соотношение сторон основания было 1:2. При угле  $\alpha=180^\circ$  клин соответственно вырождался в пластину, расположенную поперек потока. Модели изготавливались для уменьшения веса из алюминия. В связи с тем, что они в процессе эксперимента подвергались интенсивной эрозии, во избежание уменьшения миделевого сечения кормовая часть модели на длине 15 мм имела плоские образующие параллельные оси (фиг. 1, а). Таким образом сохранялся угол и мидель модели. Необходимо отметить, что поверхность клина в результате воздействия двухфазного потока значительно изменяла качество. На ней образовывались параллельные гребешки, расположенные перпендикулярно оси потока (их схематический вид показан на фиг. 1, б). Высота гребешков уменьшалась от передней части модели к задней, а угол  $\gamma$  был приблизительно постоянным и равным примерно 45–50°. Этот эффект изменял шероховатость рабочей поверхности клина.

Эрозия поверхности модели приводила к тому, что сопротивление клина в чистом газе  $X_0$  до подачи твердой фазы и после этого было различным. Поэтому, чтобы свести к минимуму влияние изменения состояния поверхности модели, применялась следующая методика измерения силы сопротивления. Вначале измерялась сила в двухфазном потоке  $X_\Sigma$ , а затем уже сила в чистом газе  $X_0$ , которая соответствовала измененной поверхности модели.

В процессе экспериментов с помощью однокомпонентных тензочувствительных измерителей измерялась сила лобового сопротивления моделей в двухфазном потоке. Предполагалось, что сила, действующая на модель в двухфазном потоке  $X_\Sigma$ , складывается из двух независимых сил: от газовой фазы  $X_0$  (т. е. при концентрации твердой фазы, равной нулю) и от воздействия частиц  $X_s$ :

$$X_\Sigma = X_0 + X_s \quad (1)$$



Фиг. 1

Вводя коэффициент сопротивления от воздействия твердой фазы  $C_{xs}$ , можно написать

$$\frac{X_\Sigma}{X_0} = 1 + \frac{C_{xs}(\rho_s)\langle u_s^2 \rangle}{C_{x0}\rho_0\langle u_0^2 \rangle} \quad (2)$$

Здесь  $C_{xs}$  и  $C_{x0}$  — коэффициенты сопротивления соответственно от воздействия только частиц и только воздуха,  $\langle u_0 \rangle$  и  $\langle u_s \rangle$  — средние по миделю модели скорости соответственно воздуха и частиц,  $\rho_0$  и  $\rho_s$  — плотности соответственно воздуха и твердой фазы (за  $\rho_s$  — принимается «размазанная» плотность твердой фазы, т. е. масса частиц в единице двухфазного объема).

Во время весового эксперимента измерялись величины  $X_0$  и  $X_\Sigma$  и далее, в результате их обработки в соответствии с соотношением (2) получались величины коэффициента сопротивления  $C_{xs}$ , характеризующие передачу импульса от твердых частиц к телу.

Все экспериментальные исследования проводились при средней (по миделю модели) скорости газа  $\langle u_0 \rangle = 200$  м/с и среднемассовой концентрации твердой фазы  $K = 0-0.3$ .

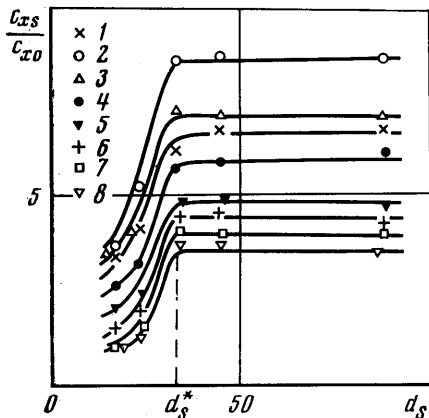
2. Весьма важным вопросом при определении аэродинамического сопротивления является, как известно, распределение параметров в потоке, которое обычно стремятся сделать более равномерным. Если в случае однофазного потока это не представляет принципиальных трудностей, то в двухфазном потоке, образующемся при истечении из трубы, имеет место значительная неравномерность параметров, управлять которой более сложно.

Для определения массы и импульса твердой фазы было измерено распределение скорости газовой  $u_0$  и твердой фазы  $u_s$ ; а также плотности твердой фазы (местной концентрации)  $\rho_s$  по сечению струи для различных размеров частиц  $d_s$  при различ-

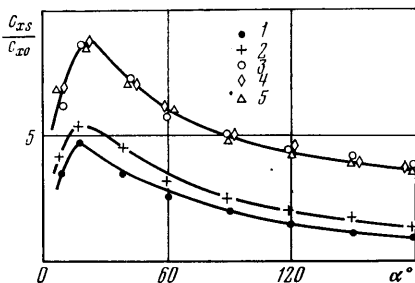
ных концентрациях  $K$ . Данные, характеризующие отставание твердой фазы от газа, даны ниже:

$d_s$ , мкм	16	23	32	44	88
$\langle u_s \rangle / \langle u_0 \rangle$	0,75	0,72	0,66	0,61	0,58

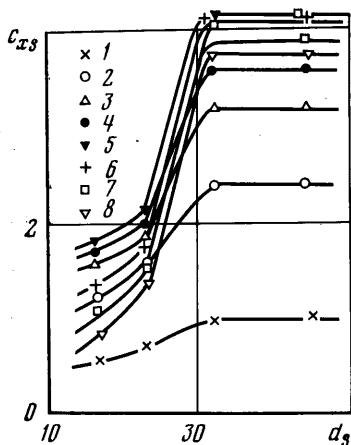
Было отчетливо видно, что на величину скольжения фаз не влияет среднемассовая концентрация при ее изменении в пределах  $K=0-0,3$ . Кроме того, введение



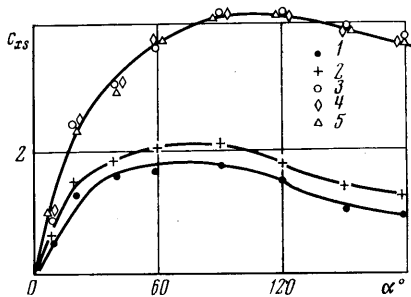
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

твердой фазы в поток в этих количествах не изменило величину и характер распределения скорости газа по сечению. Неравномерность параметров потока в пределах модели составляла по  $u_0 \pm 2,5\%$ ,  $u_s \pm 8\%$  и по  $\rho_s \pm 5,5\%$ . Надежных способов управления распределением  $u_s$  и  $\rho_s$  при течении смеси в трубе с достаточно высокими скоростями в настоящее время нет, поэтому приходится удовлетворяться такими, относительно неравномерными полями. Очевидно, что имеющаяся неравномерность и не могла значительно влиять на результаты, так как все данные по воздействию твердой фазы приведены по отношению к чистому газу.

На фиг. 1 представлена зависимость относительной силы сопротивления  $X_2/X_0$  от среднемассовой концентрации твердой фазы при различных размерах частиц для клина с углом раствора  $120^\circ$  (кривые 1). Эта зависимость, как следует из графиков, имеет линейный характер, но наклон прямой определяется величиной частиц. На том же рисунке приведена зависимость относительного коэффициента сопротивления  $C_{xs}/C_{x0}$  от среднемассовой концентрации твердой фазы. Как видно из графиков, он не зависит от концентрации твердой фазы.

Здесь экспериментальным точкам 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют средние размеры частиц  $d_s = 16, 23, 32, 44, 88$  мкм.

Зависимость относительного коэффициента сопротивления  $C_{xs}/C_{x0}$  от среднего размера частиц  $d_s$  отчетливо видна на фиг. 2. Здесь экспериментальным точкам 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 соответствуют значения угла раствора клина  $\alpha = 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 180^\circ$ . Эта зависимость может быть разделена на две области, границу между которыми определяют частицы со средними размерами порядка  $d_s^* \sim 30$  мкм. При обтекании модели двухфазным потоком с частицами  $d_s > d_s^*$  передача импульса от твердой фазы к поверхности модели (аэродинамическое сопротивление) не зависит от размеров частиц при всех углах взаимодействия. Этот результат имеет принципиальную важность как для построения теоретических схем, так и для разработки методики экспериментов.

При воздействии потока, содержащего частицы с размерами  $d_s < d_s^*$ , на пластину ( $\alpha = 180^\circ$ ) и клинья с большими углами раствора коэффициент сопротивления  $C_{xs}/C_{x0}$  также практически не зависит от величины  $d_s$ . Для клиньев с малыми углами раствора эта зависимость начинает проявляться. Можно предполагать, что в случае двухфазного потока, содержащего частицы с размерами  $d_s \sim 0$  (практически при  $d_s < 1$  мкм) в исследуемом диапазоне концентраций, коэффициент сопротивления будет равен единице. Характер этих зависимостей, очевидно, следует рассматривать с точки зрения интенсивности взаимного воздействия частиц и газа. Величина  $d_s^*$ , по всей вероятности, будет зависеть от корреляции трех величин: скорости несущей фазы, размера частиц и характерного размера тела, определяющего разворот потока газа, т. е. величин  $d_s/D$  и  $u_s/u_0$ . Предполагается, что отнесение экспериментальных результатов, характеризующих силовое воздействие только твердой фазы, к соответствующим величинам в чистом газе позволяет исключить влияние неравномерности полей скоростей несущей фазы.

Из фиг. 2 видно, что при рассматриваемых концентрациях твердой фазы аэродинамическое сопротивление только от частиц при определенных углах раствора клина может превышать (при данной средней скорости газа) сопротивление в газе в 8 раз.

Весьма неожиданным оказывается влияние угла раствора клина (фиг. 3) на его относительное аэродинамическое сопротивление. Здесь экспериментальным точкам 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют средние размеры частиц  $d_s = 16, 23, 32, 44, 88$  мкм. Оказывается, что влияние твердой фазы наиболее значительно при угле  $\alpha = 20^\circ$  при любой крупности твердых частиц и что сопротивление относительно тупых тел в двухфазном потоке меньше, чем более острых. Этот факт может говорить о наличии некоторого характерного (критического) угла взаимодействия частиц с телом, при котором (для данных материалов частиц и модели) происходит кризис обмена импульсом.

На фиг. 4 и 5 представлены зависимости коэффициента лобового сопротивления только от воздействия частиц от средней крупности частиц и угла встречи их с поверхностью модели (угла раствора клина). Здесь нумерация экспериментальных точек та, что на фиг. 2 и 4 соответственно. Характерно, что (фиг. 5) зависимость  $C_{xs} = f(\alpha)$  имеет максимум при определенных значениях  $\alpha$ , зависящих от крупности частиц. В среднем можно считать, что он наступает при угле встречи частиц с телом, равном  $45^\circ$  ( $\alpha = 90^\circ$ ). Как отмечалось многими авторами [4], примерно при таких углах встречи имеет место и максимальная интенсивность эрозии поверхности тела. Эти данные говорят о том, что здесь имеет место максимальная передача импульса от частиц к модели.

Из приведенных здесь экспериментальных данных следует, что аэродинамическое сопротивление тел в двухфазном потоке имеет ряд принципиальных особенностей, для выяснения физической природы которых необходимы дополнительные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баланин Б. А., Злобин В. В. Экспериментальное исследование аэродинамического сопротивления простых тел в двухфазном потоке. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 3, с. 159.
2. Баланин Б. А., Лашков В. А., Трахов Е. П. Экспериментальная установка для исследования двухфазных течений. — В кн.: Газодинамика и теплообмен. № 6. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.
3. Злобин В. В., Розенштейн А. З. Оптический метод измерения распределения твердой примеси в двухфазных потоках. — ПМТФ, 1975, № 1, с. 142.
4. Бирюков В. И., Виноградов В. Н., Мартиросян М. М., Михайлычев В. Н. Абразивное изнашивание газопромывочного оборудования. М.: Недра, 1977. 206 с.

Ленинград

Поступила в редакцию  
17.VI.1980